

Modellbasierte Spezifikationsmethodik zur effizienten Systementwicklung von Brennstoffzellenantrieben

Rodrigo Biurrun Sotelo



Energie & Umwelt/
Energy & Environment
Band/ Volume 252
ISBN 978-3-95806-038-8

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

Modellbasierte Spezifikationsmethodik zur effizienten Systementwicklung von Brennstoff- zellenantrieben

Rodrigo Biurrun Sotelo

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 252

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-038-8

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Herausgeber
und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek, Verlag
52425 Jülich
Tel.: +49 2461 61-5368
Fax: +49 2461 61-6103
E-Mail: zb-publikation@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de/zb

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2015

Bildquelle Titelseite: © Robert Kneschke – Fotolia.com

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 252

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-038-8

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)
unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess.

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder
in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder
unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Modellbasierte Spezifikationsmethodik zur effizienten Systementwicklung von Brennstoffzellenantrieben

von Rodrigo Biurrun Sotelo

KURZFASSUNG

Die Elektrifizierung der Fahrzeuge wird bei der Deckung zukünftiger Mobilitätsbedürfnisse eine wichtige Rolle spielen. Antriebe mit Brennstoffzellen bieten systembedingt ähnliche Reichweiten und Betankungszeiten wie konventionelle Fahrzeuge und sind daher ein vielversprechendes Konzept. Elektrische Antriebssysteme mit Brennstoffzellen sind ein typisches Beispiel moderner mechatronischer Systeme, die mechanische und elektrische/elektronische Komponenten mit eingebetteter Steuerungsoftware kombinieren.

Ziel der Systementwicklung dieser Systeme ist die Erfüllung konkurrierender Anforderungen und Nutzerbedürfnisse mit einem optimalen technischen Entwurf. Die größten Herausforderungen dabei sind die Ableitung der vollständigen Systemspezifikation auf der Basis der Nutzeranforderungen, die gemeinsame, konsistente Beschreibung von Hardware- und Softwareanteilen und die Beherrschung der resultierenden systeminternen Wechselwirkungen. Die Bewältigung dieser Aufgabe erfordert eine iterative Vorgehensweise, die insbesondere die physikalischen Besonderheiten der Brennstoffzellensysteme berücksichtigt. Ein geeigneter Ansatz ist die Nutzung modellbasierter Methoden für die Anforderungsdefinition und die Konzeptphase. Durch iterativ verfeinerte Modelle lässt sich ein Systementwurf ableiten, der Anforderungen, Struktur und Verhalten des Systems ganzheitlich betrachtet. Durch reduzierte Dokumentationsaufwände, parallelisierte Teilsystementwürfe und erleichterte physikalische Untersuchungen lässt sich dadurch die Zykluszeit der frühen Spezifikations- und Konzeptentwicklung verkürzen und der dafür notwendige Aufwand minimieren.

In dieser Arbeit wird eine modellbasierte Spezifikations- und Entwurfsmethodik definiert, welche die beschriebenen Optimierungspotentiale ausschöpft. Die Methodik basiert im Kern auf einer Fokussierung aller Entwurfsschritte auf zuvor definierten Anwendungsfällen sowie auf einem Entwurf, der parallel mehrere Perspektiven berücksichtigt. Für einen hybridisierten Brennstoffzellenantriebsstrang wird die Methodik vollständig angewandt. Alle dazu benötigten Simulationsmodelle und Werkzeuge werden vollständig implementiert.

Auf der Basis einer vollständig vernetzten Funktionszerlegung des Systems wird eine automatisierte Anordnung von Subsystemen implementiert. Die dadurch erzeugte Funktionsarchitektur zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit konventionell entwickelten Systemstrukturen.

Mittels einer physikalischen Modellierung auf der Basis der Funktionsarchitektur wird eine automatisierte Spezifikation wichtiger Subsystemparameter abgeleitet. Dabei wird ein Ansatz verwendet, der eine systematische Parametervariation mit einer statistischen Auswahl des geforderten Betriebspunkts kombiniert. Durch die Modellierung werden alle Kernparameter spezifiziert und eine Einflussanalyse einzelner Faktoren ermöglicht.

Das Verhalten des Systems wird auf der Basis der Use-Case Abläufe in Form von Zustandsautomaten implementiert. Diese bilden eine sequenzielle Steuerlogik ab, die vollständig aus der vorangehenden Systembeschreibung abgeleitet wird. Die Funktion der Zustandsautomaten wird mit einem Simulationsmodell des Kaltstarts validiert.

Die Anwendung der Methodik hat gezeigt, dass durch die iterative Modellierung, die Verwendung von Use-Cases und die teilautomatisierte Spezifikation sowohl ein den Anforderungen angemessenes System definiert wird, als auch Reduktionen des Dokumentationsaufwands und der Entwicklungszeit erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	Motivation	10
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	11
2	Systementwurf und Produktentwicklung	13
2.1	Einleitung	13
2.2	Begriffsdefinitionen	13
2.3	Grundlagen zur Methodikentwicklung	13
2.4	Grundlagen der Systementwicklung	14
2.4.1	Vorgehensmodelle der Systementwicklung	14
2.4.2	Typische Entwurfsphasen der Systementwicklung	16
2.4.3	Entwicklungsprozesse in der Systementwicklung	17
2.4.4	Modellbasierte Systementwicklungsmethoden	17
2.5	Grundlagen der Systemspezifikation	18
2.5.1	Requirements Engineering	18
2.5.2	Zielmodellierung	19
2.5.3	Use-Case-Modellierung	20
2.6	Grundlagen der Funktionsmodellierung	21
2.6.1	Der Architekturbegriff in der Systementwicklung	22
2.6.2	Modularität und Produktfamilien	24
2.6.3	Identifikation modularer Produktstrukturen	24
2.6.4	Modellierung des Systemverhaltens	26
2.6.5	Verwendete Modellelemente	26
2.7	Grundlagen der Brennstoffzellensysteme	30
2.8	Grundlagen elektrischer Antriebssysteme	31
2.9	Zusammenfassung	32
3	Ansatz für verbesserte Methodik	34
3.1	Übersicht des angestrebten Vorgehens	35
3.2	Beseitigte Probleme und resultierende Verbesserungen	36

3.3	Nachweis der Umsetzbarkeit	36
3.4	Mehrwert im Vergleich mit dem Stand der Technik	36
4	Anforderungsspezifikation	37
4.1	Einleitung	37
4.2	Angepasstes Verfahren zur Anforderungsherleitung	37
4.2.1	Aufwände der Anforderungsphase	37
4.2.2	Ziele und Nutzen der Anforderungsphase	39
4.2.3	Ableitung einer anwendungsspezifischen Spezifikationsmethodik	40
4.3	Aufbau des Zielmodells	41
4.4	Aufbau des Use-Case-Modells	45
4.5	Anforderungsspezifikation im Systemlastenheft	48
4.6	Zusammenfassung	50
5	Vorauslegung auf Systemebene	51
5.1	Einleitung	51
5.2	Definition der wichtigsten Auslegungsmerkmale	51
5.3	Vorauslegung für die Betriebsart „Fahren“	52
5.3.1	Analyse des Leistungsbedarfs	53
5.3.2	Analyse des Hybridisierungsgrads	55
5.3.3	Kostenauswirkungen der Hybridisierung	57
5.4	Dokumentation der Vorauslegung	59
5.5	Zusammenfassung	59
6	Funktionssicht: Ableitung der Funktionsarchitektur	60
6.1	Einleitung	60
6.2	Funktionsmodellierung des Antriebssystems	60
6.2.1	Identifikation der physikalischen Services	62
6.2.2	Identifikation der Funktionen	63
6.2.3	Detaillierung der Funktionen	65
6.2.4	Vernetzung der Funktionen	66

6.3	Implementierung des Verfahrens zur Subsystemdefinition	70
6.3.1	Auswahl und Implementierung der Algorithmen	71
6.4	Erprobung des Verfahrens zur Subsystemdefinition am betrachteten Anwendungsbeispiel	72
6.4.1	Referenzarchitektur zur Bewertung der Systempartitionierung	72
6.4.2	Experimentplan für die Untersuchung der Systempartitionierung	74
6.4.3	Bewertungsschema für die Partitionierungsexperimente	75
6.4.4	Subsystembildung mit Clusteralgorithmus	76
6.4.5	Subsystembildung mit matrixbasiertem Verfahren	78
6.4.6	Bewertung der Modularisierung nach Kennzahlen	80
6.4.7	Bewertung der Modularisierung nach Funktionsinhalt	82
6.5	Funktionale Architektur des Antriebssystems	83
6.6	Zusammenfassung	86
7	Physikalische Sicht: Numerische Spezifikation	88
7.1	Einleitung	88
7.2	Von der Funktionsarchitektur zum Simulationsmodell	88
7.3	Untersuchungsansatz für die numerische Spezifikation	89
7.4	Vom Systemdesign zur Parameterspezifikation	90
7.5	Physikalische Modellierung des Antriebssystems	95
7.5.1	Modellierungsansatz	95
7.5.2	Modellierung des Brennstoffzellensystems (Subsystem FP)	95
7.5.3	Modellierung der Umwelteinflüsse der Modelleingangsgrößen	106
7.5.4	Modellierung des Batteriesystems (Subsystem SP)	107
7.5.5	Modellierung der Antriebskette (Subsystem ED)	110
7.5.6	Modellierung des Kühlsystems (Subsystem CSHT)	111
7.5.7	Modellierung der Betriebsstrategie (Subsystem EP)	112

7.6	Lastpunktsimulation und Auswertung	116
7.6.1	Auswertung des Leistungsbedarfs des Antriebssystems	117
7.6.2	Auswertung der benötigten Stoffströme	117
7.6.3	Auswertung der elektrischen Leistungsverteilung	119
7.6.4	Auswertung der Brennstoffzellenparameter	121
7.6.5	Auswertung der Kühlungsrandbedingungen	122
7.7	Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Szenarien	123
7.7.1	Auswirkungen der Einsatzregion	124
7.7.2	Auswirkungen des Betriebs bei Wirkungsgradstrategie	125
7.7.3	Auswirkungen einer Degradation des Zellstapels	126
7.7.4	Auswirkungen signifikant höherer Leistungsanforderungen	126
7.8	Erkenntnisse der Simulationen mit Parametervariation	127
7.8.1	Methodikvalidierung	127
7.8.2	Spezifikation physikalischer Parameter	127
7.8.3	Sensitivität auf Parametervariation	128
7.8.4	Sensitivität auf Anforderungsänderung	128
7.9	Zusammenfassung	128
8	Ablaufsicht: Definition des Systemverhaltens	129
8.1	Einleitung	129
8.2	Von der Use-Case-Definition zur Ablauflogik	129
8.2.1	Identifikation der Systemaktivitäten	131
8.2.2	Aufbau der Verhaltensmodelle als Aktivitätsdiagramme	133
8.3	Ablaufplanung und Netzwerkanalyse	134
8.3.1	Aufbau des Aktivitätsnetzwerks	135
8.3.2	Ablaufplanung für den Start-Use-Case	136
8.3.3	Zustandsidentifikation für den Start-Use-Case	138
8.4	Zusammenfassung	139
9	Zustandssicht: Entwurf der Steuerlogik	141
9.1	Einleitung	141

9.2	Von der Ablauflogik zur Zustandsbeschreibung	141
9.2.1	Entwurfskonzept	142
9.2.2	Vorgehensweise und Entwurfsmuster für das Antriebssystem	142
9.3	Entwurf der Zustandsautomaten	142
9.4	Verhaltenssimulation für den Systemstart	146
9.4.1	Implementierung der Zustandsautomaten in Stateflow	146
9.4.2	Aufheizmodell des hybridisierten Brennstoffzellensystems	146
9.4.3	Simulation des Systemverhaltens für den Kaltstartfall	149
9.5	Zusammenfassung	151
10	Zusammenfassung und Ausblick	152
10.1	Zusammenfassung	152
10.2	Ausblick	158
11	Anhang A	160
11.1	Bekannte Prozesse und Standards der Systementwicklung	160
11.2	Bekannte modellbasierte Systementwicklungsmethoden	161
12	Anhang B	164
12.1	Brennstoffzellen – Aufbau und Wirkungsweise	164
12.2	Brennstoffzellensysteme im Fahrzeug	167
12.2.1	Topologien	167
12.2.2	Wasserstoffversorgung und Rezirkulation	168
12.2.3	Sauerstoffversorgung und Kathodendruck	168
12.2.4	Kathodenluftbefeuchtung	169
12.2.5	Spannungslage und Bordnetzanschluss	170
12.2.6	Abfuhr der Reaktionswärme und Temperatureinfluss	171
12.3	Einsatzszenario der Fahrzeuganwendung	172
12.3.1	Anforderungen	172

12.3.2	Systembetrieb im Fahrzeug	173
13	Anhang C	174
13.1	Antriebsstrangkomponenten elektrischer Antriebssysteme	174
13.1.1	Energiespeicher: Grundlagen und Anforderungen	174
13.1.2	Elektrische Maschinen – Grundlagen und Anforderungen	177
13.1.3	Getriebe in elektrischen Traktionssystemen	180
13.1.4	Grundlagen der Leistungselektronik	182
14	Anhang D	187
14.1	Clusterungsverfahren	187
14.2	Matrixbasierte Verfahren	188
14.3	Implementierung des Clusterungsverfahrens	190
14.3.1	Auswahl der Distanznorm für den Clusteralgorithmus	190
14.3.2	Implementierung der Distanznorm	190
14.3.3	Implementierung des Clusteralgorithmus	191
14.3.4	Auswahl des matrixbasierten Verfahrens	193
14.3.5	Implementierung des matrixbasierten Verfahrens	194
15	Anhang E	195
15.1	Statistische Parametrierung der Fahrzeugbetriebspunkte	195
15.2	Statistische Parametrierung der Umweltparameter	196
16	Anhang F	197
16.1	Inhaltliche Übersicht der Entwurfsmethodik	197
16.2	Use-Case-Modell der Fahrzeugebene	198
16.3	Physikalischer Kontext Betriebsart „Fahren“	199
16.4	Darstellung der Funktionszerlegung	200
16.5	Notationen der Funktionsmodellierung	204
16.6	Sequenzdiagramm mit State-Identifikation für den Start-Use-Case	206

16.7	Ergebnisse der Clusterexperimente	209
16.8	Eingangsszenario zur Validierung der Zustandsautomaten	215
17	Literatur	218
18	Verzeichnisse	234
18.1	Abbildungsverzeichnis	234
18.2	Tabellenverzeichnis	243
18.3	Abkürzungen und Formelzeichen	244

1 Einleitung

1.1 Motivation

Es wird allgemein erwartet, dass elektrische Antriebssysteme in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Deckung des Bedarfs an individueller und öffentlicher Mobilität spielen werden. Einen vielversprechenden Ansatz hierfür stellen Antriebe mit Brennstoffzellen dar, da sie systembedingt größere Reichweiten und kürzere Betankungszeiten erlauben als jene mit Batterien. Elektrische Antriebssysteme mit Brennstoffzellen sind ein typisches Beispiel eines modernen mechatronischen Systems. Systeme dieser Art vereinen mechanische und elektrische/elektronische Komponenten mit eingebetteter Steuerungssoftware.

Moderne mechatronische Systeme zeichnen sich durch ihre hohe Komplexität aus. Sie beinhalten oft einen hochintegrierten Verbund von Teilsystemen mit vielfältigen Wechselwirkungen. Allen neuen Entwicklungen im Automobilumfeld werden zudem die Einbindung immer neuer Funktionen, die Konnektivität mit externen Systemen, wie Lade-, Tank- oder Diagnosesystemen und die Nutzung der jeweils neuesten Technologien abverlangt. Zusätzlich besteht der Wunsch nach immer kürzeren Entwicklungszyklen, einer hohen Variantenvielfalt sowie geringen Entwicklungs- und Systemkosten.

Die Prozesse und Methoden der Systementwicklung müssen sich in diesem Spannungsfeld aus Systemkomplexität, Entwicklungszeit und Kosten bewegen. Aufgabe der Systementwicklung ist die Untersuchung der Nutzerbedürfnisse und deren Überführung in einen technischen Entwurf. Die Grundlage dafür muss eine Beschreibung der tatsächlichen Verwendung des Systems sein, welche es ermöglicht die Bedürfnisse der diversen beteiligten Akteure auf bestmögliche Weise in Einklang zu bringen. Zudem ist es überaus wichtig, alle Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen und Komponenten zu kennen und zu berücksichtigen. Nur durch den Fokus auf Nutzerbedürfnisse und Systemwechselwirkungen lässt sich ein ausgewogenes System definieren, das der Aufgabe angemessen ist und die gestellten Anforderungen nicht übererfüllt. Dadurch lässt sich der Entwicklungsaufwand in Bezug auf Kosten und Zeit minimieren.

Um die geschilderten Aspekte einer optimalen Systementwicklung wie beschrieben umzusetzen, müssen einige Hindernisse überwunden werden. Die Vorstellung der Entwicklung als sequentielle Kette von Entwicklungsaktivitäten, die nur einmal durchlaufen werden, ist weit verbreitet. Die Systementwicklung hat jedoch einen überwiegend iterativen Charakter, der aus wiederholten Zyklen aus Analyse, Entwurf und Test besteht. Ebenso sind Methoden, die wie in der allgemeinen Softwareentwicklung auf einem schrittweisen Aufbau eines Systems beruhen, für physikalisch dominierte Antriebssysteme meist nicht umsetzbar. Die physikalische Realität erfordert von Anfang an eine Auseinandersetzung mit dem Gesamtsystem.

Die klassische Entwicklungsarbeit wird zudem dokumentenbasiert betrieben. Die Konsistenz zwischen Dokumenten, Spezifikationen und Modellen ist dabei nur sehr schwer herstellbar. Varianten des Systems können nur mit hohem Aufwand entworfen und beschrieben werden. Eine wirkliche Ableitung der Anforderungen als Grundlage für den Systementwurf findet oft nicht statt. Zudem werden die Ebenen der Hardware und der Software meistens völlig getrennt beschrieben, da eine übergeordnete Systembeschreibung in der Regel vernachlässigt wird. Stattdessen wird angestrebt, schriftliche Anforderungen in Hardware- und Softwareanteile zu trennen, obwohl eine gemeinsame Beschreibung zweckmäßiger wäre.

Zur Überwindung der genannten Herausforderungen können modellbasierte Systementwicklungsmethoden verwendet werden. Dabei werden auch in sehr frühen Phasen der Systemanalyse und des Entwurfs, konzeptionelle graphische und mathematische Modelle verwendet. Das Aufkommen und die zunehmende Verbreitung von Beschreibungsnotationen, wie der SysML (Systems Modeling Language) ermöglicht eine solche Arbeitsweise. Sie ist eine logische Ergänzung der Entwicklungsarbeit, in der gegenwärtig bei praktisch jeder Tätigkeit modellbasierte Ansätze eingesetzt werden.

In dieser Arbeit wird eine modellbasierte Methodik für frühe Phasen der Entwicklung elektrischer Antriebssysteme mit Brennstoffzellen beschrieben. Diese soll die Anforderungsanalyse und den Entwurf des Systemkonzepts optimieren und das Potential zur Effizienzsteigerung, welches die modellbasierte Systementwicklung bietet, ausschöpfen.

Mit der vorgeschlagenen Methodik lässt sich ein zentrales Systemmodell iterativ von mehreren Entwicklern bearbeiten und verbessern. Einzelne Systemteile lassen sich in Struktur und Verhalten

modellieren. Schnittstellen können aus der Gesamtsystemperspektive definiert werden, so dass eine parallele Entwicklung verschiedener Subsysteme möglich ist. Unterschiedliche Systemvarianten lassen sich darstellen und Einflüsse auf Systemstruktur, Anforderungen und Funktionen untersuchen. Neben den inhaltlichen Verbesserungen beim Entwurf des Systems ergibt sich daher auch die Möglichkeit zur Effizienzsteigerung im Entwicklungsablauf. Diese resultiert aus reduzierten Zykluszeiten und Dokumentationsaufwänden sowie direkt aus dem Systemmodell abgeleitete Simulationsuntersuchungen, wodurch die physikalische Modellierung unterstützt wird.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Um den beschriebenen Herausforderungen zu begegnen, wird in der vorliegenden Arbeit eine *Methodik zur Systementwicklung* definiert und implementiert, die eine klare Verbesserung im Vergleich zu herkömmlichen Vorgehensweisen darstellt. Als Anwendungsbeispiel wird für einen hybridisierten Antriebsstrang mit Brennstoffzellen- und Batteriesystem eine *vollständige Anforderungsanalyse* mit anschließender *Spezifikation der benötigten Subsysteme* durchgeführt. Dabei werden die physikalische Auslegung sowie die Definition der Kontrolllogik zur Ablaufsteuerung des Systems berücksichtigt. Die benötigte Werkzeugkette sowie benötigte Simulationsmodelle werden vollständig implementiert.

Als Basis aller Auslegungsschritte dient eine *Untersuchung des Nutzerverhaltens*. Zur Beschreibung des Nutzerverhaltens werden Anwendungsfälle definiert, nach denen der gesamte Systementwurf ausgerichtet wird. Dabei werden zu jedem Zeitpunkt Besonderheiten der Brennstoffzellensysteme und bekannte Untersuchungsschwerpunkte berücksichtigt.

Im folgenden Kapitel 2 werden die *naturwissenschaftlichen und technischen Grundlagen* im Zusammenhang mit elektrischen Antriebssystemen und Brennstoffzellen beschrieben. Dabei werden sämtliche Komponenten des Antriebsstrangs, die später in der Spezifikation untersucht werden, behandelt. Neben den Grundlagen werden auch die relevantesten Auslegungsgrößen beschrieben, die in der späteren Parametrierung zu berücksichtigen sind. Anhand konkreter Beispiele werden außerdem sämtliche Modelle und Notationselemente der in dieser Arbeit verwendeten Beschreibungsnotation SysML (Systems Modeling Language) erläutert. Die Themenkomplexe der Systementwicklungsprozesse und insbesondere das „Requirements Engineering“ werden ebenfalls beschrieben, um eine vollständige Grundlage für die Bewertung der hier vorgestellten Methodik zu liefern.

In Kapitel 3 wird die verwendete *modellbasierte Methodik für Spezifikation und Vorentwurf des Antriebssystems* definiert. Alle nachfolgenden Kapitel sind entsprechend der definierten Schrittfolge der Methodik gegliedert und zeigen die relevanten Implementierungen, Untersuchungen und Ergebnisse. Die Methodik beginnt mit der Anforderungsanalyse, gefolgt von einem Vorauslegungsschritt bei dem die relevanten Anforderungen in grundlegende Systemparameter überführt werden. Danach erfolgt die modellbasierte Spezifikation mit vier grundlegenden Blickwinkeln, den sogenannten „Entwurfssichten“: die Funktionen des Systems; die physikalische Parametrierung; die Definition logischer Abläufe und die Ableitung der Systemzustände, die zur Ablaufsteuerung im System benötigt werden.

Kapitel 4 bildet mit der *Anforderungsanalyse* den Einstieg in die Systementwicklung des hier als Anwendungsbeispiel betrachteten elektrischen Antriebs. In diesem Schritt werden Modelle der Nutzerbedürfnisse und der Anwendungsfälle erstellt und beschrieben. Sie bilden in einem Umfeld unbekannter Nutzeranforderungen den Einstieg in den Entwurf des Systems. Die Erstellung eines zugehörigen Lastenhefts wird beschrieben und die Vorteile der Herangehensweise erarbeitet.

In Kapitel 5 wird eine *physikalische Vorauslegung auf Systemebene* durchgeführt. In dieser Vorauslegung werden für einzelne Betriebsarten relevante Entwurfsentscheidungen getroffen, welche die spätere Auslegung maßgeblich beeinflussen. Als Anwendungsbeispiel werden für den Fahrzeug-Fahrbetrieb geforderte Fahrleistungen in einer Längsdynamikberechnung in Leistungs- und Drehmomentspezifikationen überführt. Für das Hybridsystem aus Brennstoffzelle und Batterie werden unterschiedliche Hybridisierungsgrade im Hinblick auf Wasserstoffverbrauch und Komponentenkosten untersucht und bewertet. Die berechneten Beispielauslegungen bilden die Basis für spätere Untersuchungen.

Die Kapitel 6, 7, 8 und 9 stellen je einen der Blickwinkel des Entwurfs (die Entwurfssichten) dar, die in der modellbasierten Spezifikation verwendet werden. Abbildung 1 zeigt die hier verwendeten Entwurfssichten und die entsprechenden Kapitel:

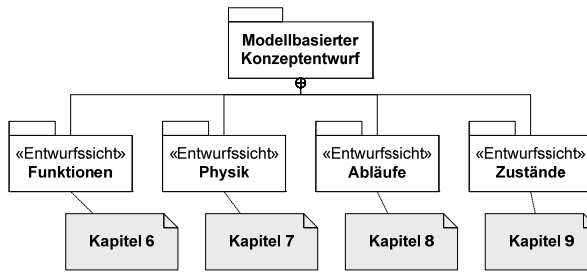


Abbildung 1: Sichten des Entwurfs und entsprechende Kapitelstruktur

Den Einstieg bildet die im Kapitel 6 beschriebene *Funktionsanalyse*. Hier wird basierend auf der Modellierung der Anwendungsfälle eine Beschreibung der Systemumgebung erstellt. Darauf aufbauend wird definiert, welche Funktionen das System bereitstellen muss. Für die Zerlegung in Funktionen wird eine Technik eingeführt, die es erlaubt, Systeme mit multiplen Inputs- und Outputs (MIMO) in Funktionsbäume zu gliedern und die darin enthaltenen Funktionen vollständig zu vernetzen. Dadurch wird ein Funktionsnetzwerk aufgebaut, das als Grundlage für die Erstellung einer *Funktionsarchitektur* dient. Die Funktionsarchitektur ist ein Modell des Systems, welches sowohl Hardware- als auch Softwareinhalte umfasst. Zur Erstellung der Funktionsarchitektur wird ein Clusteralgorithmus verwendet, der das Funktionsnetzwerk basierend auf den Netzwerkverbindungen und einem Gewichtungsschema in Subsysteme aufteilt. Der Clusteralgorithmus und die gesamte Werkzeugkette zur Verarbeitung der Funktionszerlegung werden in Matlab implementiert.

Die *physikalische Parametrierung*, die in Kapitel 7 beschrieben wird, nutzt die in der Funktionsanalyse definierten Funktionen, Subsysteme und Schnittstellen zur Erstellung von Wirkketten und deren Modellierung in Matlab/Simulink. Die physikalische Modellstruktur wird dabei vollständig aus der beschreibenden SysML Strukturmodellierung hergeleitet. Dadurch wird es möglich, mit einem schnell erstellbaren Prototypen, einen Wertebereich für alle gesuchten Parameter zu berechnen. Dies ist die Grundlage für einen parallelisierten Entwurf der Subsysteme. Um ein angemessenes System zu spezifizieren, das die Nutzeranforderungen nicht übererfüllt, wird ein Modellierungsansatz definiert, der eine statistische Auswahl von Streckendaten und Umweltparametern beinhaltet. Damit wird ein realistisches Nutzungsverhalten abgebildet und aufgezeigt, mit welchen Parameteränderungen die Produktkosten reduziert werden könnten. Mit einer Reihe von Simulationen werden für das betrachtete Anwendungsbeispiel alle in der Funktionszerlegung definierten Größen parametrisiert. In einer Sensitivitätsanalyse wird dann der Effekt der Variation ausgewählter Einflussfaktoren aufgezeigt.

Kapitel 8 beschreibt die *Ausarbeitung logischer Ablaufketten* auf Basis der Anwendungsfälle. Dadurch wird die für eine Systementwicklung zentrale Kombination von Funktion, Struktur und Verhalten vervollständigt. Mit den Modellelementen der SysML werden Ablaufmodelle erstellt, die alle Interaktionen zwischen Nutzer und Fahrzeug beschreiben. Wie in allen anderen Untersuchungen wird hier eine Modellierung für einzelne Betriebsarten beschrieben. Aus den im Ablaufmodell enthaltenen Systemaktivitäten lässt sich im Anschluss ein Aktivitätsnetzwerk erstellen, welches zentrale Aufgaben der Systemsteuerung und deren Abhängigkeiten darstellt. Am Beispiel des Startablaufs wird die Modellumwandlung in ein Sequenzdiagramm dargestellt. Auf Basis des Sequenzdiagramms werden Steuerungsanteile auf einzelne Subsysteme verteilt und die Definition von Systemzuständen ermöglicht.

Aufbauend auf der Basis der Zustandsidentifikation in Kapitel 8 wird in Kapitel 9 die *Erstellung eines Zustandsautomaten* für das Anwendungsbeispiel des Startablaufs beschrieben. Die darin enthaltene Schaltlogik wird zur Steuerung der Abläufe verwendet und ist die Grundlage für den Entwurf der Steuerungssoftware des Brennstoffzellensystems. Die Zustände und Zustandsübergänge werden zunächst in SysML modelliert. Im Anschluss wird ein Prototyp in der Matlab-Toolbox „Stateflow“ implementiert, der es ermöglicht das angestrebte Systemverhalten in einem physikalischen Modell zu testen. Dazu wird der Zustandsautomat mit einem physikalischen Aufheizmodell für Brennstoffzelle und Batterie, gekoppelt. Dadurch wird aufgezeigt, wie sich auch für physikalisch dominierte Systeme ähnliche Szenariotests wie in der Softwareentwicklung nutzen lassen.

In Kapitel 10 werden die *Ergebnisse der Arbeit* zusammengefasst und kritisch diskutiert. Es werden sowohl inhaltliche Aspekte der durchgeführten Systemanalyse als auch die methodisch erreichten Verbesserungen dargestellt und erläutert.

2 Systementwurf und Produktentwicklung

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden alle technischen und naturwissenschaftlichen Grundlagen beschrieben, die für die Methodikentwicklung und die Anwendung auf Brennstoffzellensysteme relevant sind. Umfang und Detaillierungsgrad der gesuchten Methodik sind abhängig vom betrachteten Produkttyp und den Entwicklungsabläufen, in welche die Methodik eingebettet werden soll. Daher werden insbesondere die Grundlagen der Systementwicklung mit ihren wesentlichen Phasen beschrieben. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Fall die Phase der Anforderungsentwicklung, für die eine gesonderte Beschreibung erfolgt. Die Anwendung der Methodik betreffend werden die Grundlagen modularer Produktstrukturen beschrieben, sowie die technischen Grundlagen sämtlicher Komponenten elektrischer Antriebsstränge erläutert.

2.2 Begriffsdefinitionen

Nach [1] kann ein System prinzipiell als eine „*abgegrenzte Anordnung aufeinander einwirkender Gebilde*“ verstanden werden. Bei diesen Gebilden kann es sich um mechanische Komponenten, Softwaremodule oder elektronische Hardware handeln, aber auch um Personen und Informationen. Die Systemkomponenten erreichen zusammen eine Wirkung, die über die Einzelwirkungen ihrer Bestandteile hinausgeht. Diese Wirkung kann in einer Funktion bestehen, einer Systemqualität oder einem Verhalten [2]. Im Rahmen dieser Arbeit werden elektrische Antriebssysteme mit Brennstoffzellen betrachtet. Dabei handelt es sich um mechatronische Systeme aus einer Vielzahl von Komponenten und Softwareanteilen. Die Bezeichnung „*System*“ umfasst hier verschiedene Ebenen, wie das Brennstoffzellensystem, das System Antriebsstrang oder das System Fahrzeug. Die Hierarchie der betrachteten Systemebenen ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

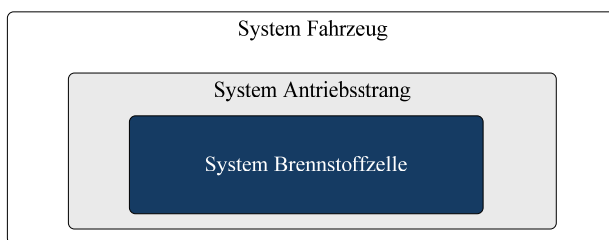


Abbildung 2: Hierarchie der betrachteten Systemebenen

In dieser Arbeit werden sowohl rein mechanische oder elektrische Systeme als auch Systeme mit eingebetteter Software betrachtet. Die besondere Herausforderung in der Entwicklung softwareintensiver, mechatronischer Systeme liegt in der Integration der zusammenwirkenden Domänen. Jede der Domänen (Mechanik, Elektrik, Software, etc.) verfügt über eigene Begriffe, Beschreibungstechniken und Entwicklungsmethoden. Für die Entwicklung mechatronischer Systeme müssen Modellierungs- und Entwurfstechniken in geeigneter Art und Weise kombiniert werden. Da hier ein vollständiger Antriebsstrang mit Brennstoffzellen betrachtet wird, müssen die Domänen der Verfahrenstechnik, der Mechanik und Elektrotechnik ebenso beschrieben werden, wie integrierte Logiken und Softwareanteile.

In allen nachfolgenden Betrachtungen wird der Brennstoffzellenantriebsstrang als hybrides, dynamisches System angesehen, in dem Berechnungsprozesse mit physikalischen Prozessen interagieren. Das System verfügt zudem sowohl über kontinuierliches Verhalten, als auch über diskretes, ereignisgesteuertes Verhalten. Das kontinuierliche Verhalten resultiert aus physikalischen Prozessen, ist abhängig von Parametern mit kontinuierlichen Werten und wird mit Differentialgleichungen beschrieben. Das diskrete Verhalten mit seiner Umschaltlogik wird durch einen überlagerten Zustandsautomaten wiedergegeben. Damit wird ein zusätzliches logisches Verhalten aufgeprägt [3].

2.3 Grundlagen zur Methodikentwicklung

Kern dieser Arbeit ist die Ausarbeitung einer neuen Methodik zur Spezifikation und kundenorientierten Entwicklung elektrischer Antriebssysteme. Bisherigen Entwicklungsansätzen hierfür fehlen die Durchgängigkeit von der Anforderung bis zum System und der Bezug zur konkreten Kundenverwen-

ung. Insbesondere die Definition der Systemanforderungen lässt sich weiter systematisieren und verbessern, u.a. um sicherzustellen, dass stets alle Anforderungen angemessen berücksichtigt werden.

Um Merkmale wie Umfang und Detaillierungsgrad einer solchen Entwicklungsmethodik zu definieren muss der Blick zunächst auf die Entwicklungsaufgabe selbst gerichtet werden. Der erforderliche Entwicklungsaufwand hängt sehr stark davon ab, welcher Produkttyp bearbeitet wird, in welche übergeordneten Entwicklungsprozesse die jeweilige Aufgabe eingebettet ist und welche Domäne betrachtet wird. Die Methodik muss daher einerseits flexibel genug sein, damit der Entwicklungsaufwand der anstehenden Aufgabe angemessen gestaltet werden kann. Andererseits muss sie die volle Komplexität der Entwicklungsaufgabe mit einbeziehen, um auch bei umfangreichen Entwicklungsaufgaben eingesetzt werden zu können.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden müssen zuerst die Grundlagen und Verbesserungspotentiale der Systementwicklung und speziell der Spezifikation von Systemen systematisch untersucht werden. Außerdem müssen Grundlagen und Stand der Technik der Brennstoffzellen und der elektrischen Antriebstechnik dargestellt werden, um die Besonderheiten der Brennstoffzellen und der Fahrzeuganwendung zu berücksichtigen. Basierend auf dieser Beschreibung wird nach Abbildung 3 ein Ansatz für eine verbesserte Spezifikations- und Entwicklungsmethodik abgeleitet.

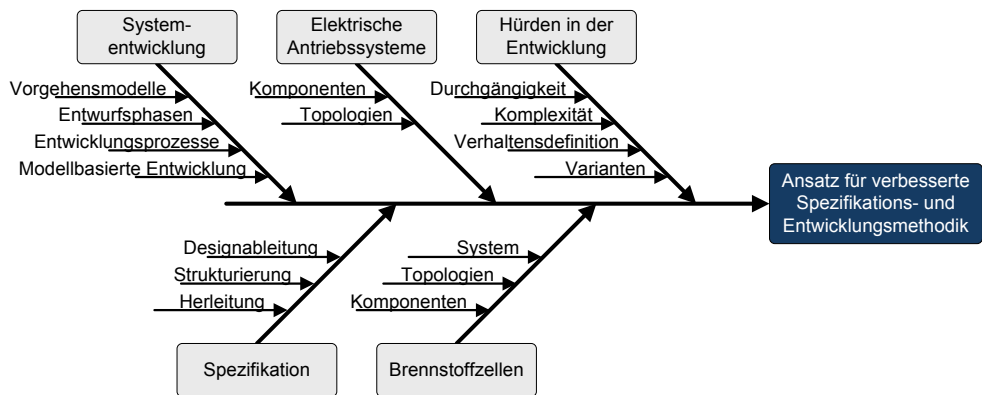


Abbildung 3: Einflussfaktoren und zu untersuchende Grundlagen für die Methodenableitung

Der Schwerpunkt der Grundlagenanalyse liegt auf der Systemspezifikation und auf der Entwicklungsmethodik, die den Kern dieser Arbeit bilden. Ausführliche Beschreibungen der elektrischen Antriebskomponenten können 13.1 entnommen werden.

2.4 Grundlagen der Systementwicklung

Die Entwicklung von Systemen ist ein interdisziplinärer Prozess, dessen Ziel es ist, ein Zusammenwirken von Systembestandteilen so zu organisieren, dass eine gewünschte Zielfunktionalität erreicht wird. Laut der Begriffsbestimmung von INCOSE (International Council on Systems Engineering) umfasst die Systementwicklung die Identifizierung von Kundenbedürfnissen und die Definition der daraus resultierenden, erforderlichen Funktionalität sowie die Dokumentation der technischen Anforderungen. Darauf aufbauend wird ein Systemdesign erstellt und validiert. Dabei wird zu jedem Zeitpunkt die Gesamtheit des Problems, bestehend aus Anwendung, Kosten, Performanz und Test, betrachtet. Die Systementwicklung muss dazu unterschiedliche Ingenieursdisziplinen integrieren um ein Produkt zu entwerfen, das bestmöglich auf die definierten Anforderungen passt [4].

2.4.1 Vorgehensmodelle der Systementwicklung

Als Grundlage der Systementwicklung und als Basis für jede Entwicklungsmethodik dient stets ein Vorgehensmodell. Dieses besteht aus einer Reihe von Analyse- und Entwurfsphasen, die im Sinne eines Entwicklungslebenszyklus angeordnet sind. In der System- und Softwareentwicklung gibt es eine Fülle von Vorgehensmodellen. Nach [5] basieren die meisten auf drei Grundtypen, dem *Wasserfallmodell* nach Royce, dem *Spiralmodell* nach Boehm oder dem *V-Modell*.

- **Wasserfallmodell:** Das Wasserfallmodell basiert auf einer sequenziellen Abfolge klar abgegrenzter Entwurfsphasen. Der Ursprung dieses Modells liegt in mechanischen Entwurfsmethoden, es wurde

aber auch für die Softwareentwicklung adaptiert. Das Wasserfallmodell wird oft kritisiert, da Entwurfsphasen nicht als diskrete, abgeschlossene Stufen betrachtet werden können [6]. Die Phasen des Wasserfallmodells sind jedoch auch als Orientierungshilfe von Bedeutung, wenn sie nicht streng sequenziell, sondern iterativ durchlaufen werden [7]. In Abbildung 4 sind die Phasen des Wasserfallmodells nach einer frühen Formulierung gemäß [6] dargestellt.

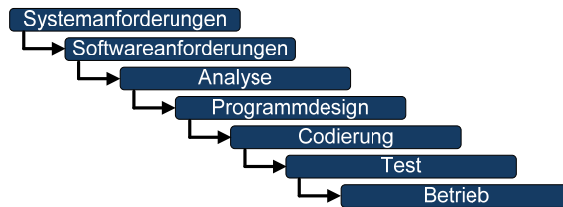


Abbildung 4: Phasen des Wasserfallmodells nach [6]

- **Spiralmodell:** Ein Vorgehensmodell, welches Elemente inkrementeller Entwicklung mit den Phasen des Wasserfallmodells verbindet, ist das von Boehm eingeführte Spiralmodell [8] in Abbildung 5:

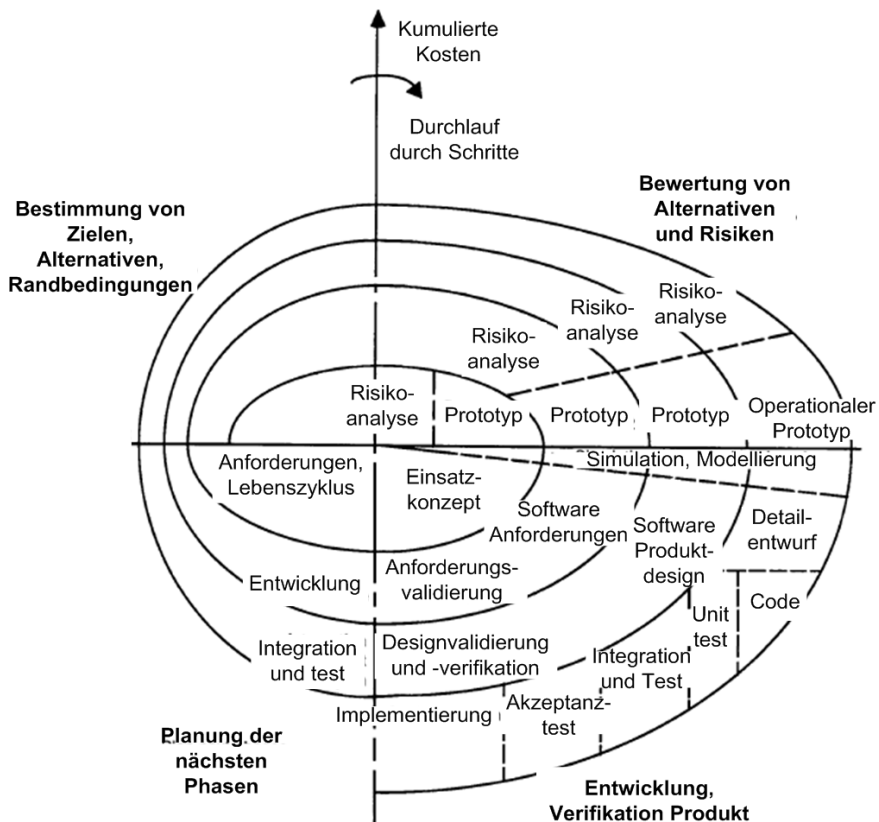


Abbildung 5: Phasen des Spiralmodells nach [8]

Bei jeder Iteration des Zyklus wird das Produktdesign erweitert; Dokumente werden dann erzeugt, wenn sie gebraucht werden [8]. Das Spiralmodell entspricht weitestgehend der intuitiven Vorstellung von einem Entwicklungsablauf. Wie aus Abbildung 5 deutlich wird, sind die Phasen denen des Wasserfall- oder des V-Modells sehr ähnlich.

- **V-Modell:** Das V-Modell ist eine weit verbreitete Darstellung des Lebenszykluses der Systementwicklung. Die Phasen und die Ablaufvorstellung entsprechen in weiten Teilen denen des Was-

serfallmodells. Der wesentliche Unterschied ist der Fokus auf Test- und Integrationsphasen, die den Spezifikations- und Designphasen zugeordnet sind. In Abbildung 6 ist beispielhaft ein V-Modell mit den Ästen der Systemspezifikation und der Systemintegration, in Anlehnung an [9] dargestellt.

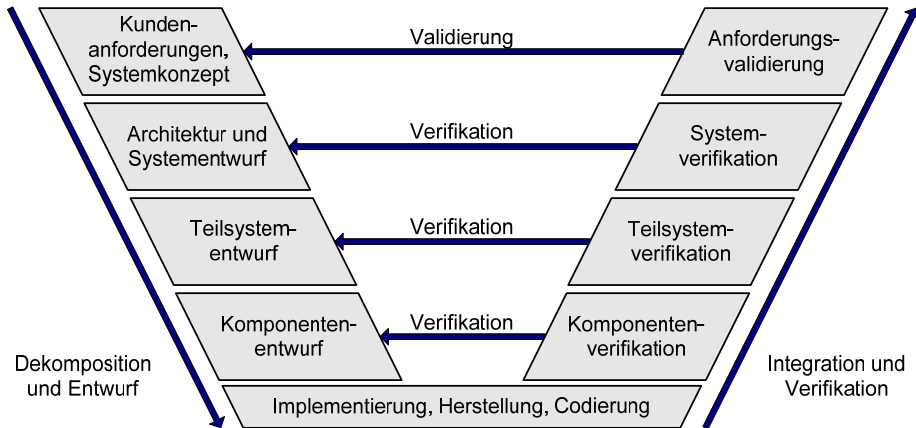


Abbildung 6: V-Modell der Systementwicklung

Nach [5] ist die Phasenvorstellung des V-Modells die Grundlage für eine Vielzahl von Entwicklungsmethodiken im Bereich der Systementwicklung.

2.4.2 Typische Entwurfsphasen der Systementwicklung

Den meisten Vorgehensmodellen liegen typische Entwurfsphasen zugrunde. Diese sind:

- Anforderungsspezifikation
- Funktionsanalyse und Entwurf der Systemarchitektur
- Entwurf und Implementierung
- Integration und Test

Um die in dieser Arbeit entwickelte Methodik inhaltlich einordnen zu können, ist eine kurze Beschreibung dieser Phasen notwendig.

- **Anforderungsspezifikation:** Die Anforderungsspezifikation befasst sich mit der Identifizierung von Kundenbedürfnissen und deren Übersetzung in technische Anforderungen. Als Teil der Konzeptphase ist sie ein wichtiger Schritt jeder Systementwicklung. Nach [10] lassen sich Anforderungen in drei Typen unterteilen:
 - Funktionale Anforderungen: „Eine funktionale Anforderung definiert eine vom System bzw. von einer Systemkomponente bereitzustellende Funktion oder einen bereitzustellenden Service“ [10]
 - Qualitätsanforderungen: „Eine Qualitätsanforderung definiert eine qualitative Eigenschaft des gesamten Systems, einer Systemkomponente oder einer Funktion“ [10].
 - Rahmenbedingungen: „Eine Rahmenbedingung ist eine organisatorische oder technologische Anforderung die die Art und Weise einschränkt, wie ein Produkt entwickelt wird.“ [10]

Das Erheben und Verfolgen von Anforderungen zieht sich durch den gesamten Entwicklungsablauf.

- **Funktionsanalyse und Systemarchitektur:** In der Phase der Funktionsanalyse werden Ziel-funktionalitäten definiert, die das System bereitstellen muss. Die Zerlegung in Funktionen ist ein zentraler Teil der Produktentwicklung und endet mit der Erstellung einer funktionalen Systemarchitektur. Die funktionale Architektur ist eine strukturierte Darstellung aller Systemfunktionen, Aktivitäten oder Prozesse innerhalb eines Systems. Dabei handelt es sich um eine lösungsneutrale Darstellung, die erst in nachfolgenden Schritten in konkrete, technische Entwürfe überführt wird.
- **Entwurf und Implementierung:** In der Entwurfs- oder Designphase werden konkrete Systemtopologien entworfen und Bestandteile der Lösung festgelegt. Dies betrifft sowohl den Entwurf mechanischer oder elektrischer Teilsysteme als auch die Definition der beteiligten Kontrollsoftware. Die Designphase beinhaltet darüber hinaus alle Schritte der physikalischen Modellierung, Berechnung oder Programmierung.

- **Integration und Test:** Die Integration bezeichnet die Zusammensetzung von Teilsystemen oder Komponenten zu einem lauffähigen Gesamtsystem. Dabei wird einerseits die physikalische Interaktion hergestellt, als auch die Parametrierung oder Zusammenführung von Anteilen der Kontrollsoftware realisiert. Im V-Modell nach Abbildung 6 ist jeder Phase der Spezifikation oder des Entwurfs ein Integrations- und Testschritt zugeordnet. Im Test wird das System oder Teile davon auf das Einhalten der Spezifikation überprüft.

2.4.3 Entwicklungsprozesse in der Systementwicklung

Ein Prozess ist nach [5] eine logische Abfolge von Aufgaben, die abgearbeitet werden müssen um ein Ziel zu erreichen. Ein Prozess definiert das „Was“ ohne zu benennen „Wie“ die Aufgaben erledigt werden sollen. Eine Methodik wie sie in dieser Arbeit entwickelt wird, ist hingegen nach [5] eine Sammlung verwandter Prozesse, Methoden und Werkzeuge, die auf eine bestimmte Klasse von Problemen angewendet werden können. Durch die Methodik wird das „WIE“ und das „WOMIT“ definiert. Obwohl in dieser Arbeit eine neue Methodik entwickelt und erprobt und kein Prozess definiert wird, ist es sinnvoll, die Grundlagen gängiger Entwicklungsprozesse zu analysieren um sicherzustellen, dass hier definierte Arbeitsschritte sich auch in gängige Organisationsabläufe einbinden lassen. Einige bedeutende Beispiele für Entwicklungsprozesse, die für diese Arbeit evaluiert wurden, sind daher in 11.1 beschrieben.

Erwartungsgemäß enthält keine der untersuchten Beschreibungen genaue Vorgaben, wie die einzelnen Aufgaben erfüllt werden müssen. Für die hier definierten Systeme nach 2.2 werden daher zusätzlich bekannte Methoden der modellbasierten Entwicklung softwareintensiver Systeme betrachtet.

2.4.4 Modellbasierte Systementwicklungsmethoden

In der modellbasierten Systementwicklung spielen Modelle eine entscheidende Rolle in den Phasen der Spezifikation, des Designs, der Integration und der Validierung von Systemen. Der iterative Aufbau dieser Modelle macht deren Verwendung in der Auslegung von Antriebssträngen interessant. In dieser Arbeit wurden daher einige relevante modellbasierte Systementwicklungsmethoden systematisch evaluiert.

Nach [5] werden bei diesen Verfahren traditionelle, dokumentenbasierte Entwicklungsabläufe durch die Dokumentation und Entwicklung in modellbasierter Notation ersetzt. Beschreibende oder lauffähige Modelle werden dabei in iterativen Vorgehensweisen sukzessive verbessert. Für beschreibende Modelle gibt es eine Vielzahl von Notationen aus den Bereichen der Software- und Systementwicklung oder der Produktentwicklung. Diese werden in nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben. In [11] wird der modellbasierte Systementwurf als ein Grundmuster beschrieben, das in jeder Phase der Entwicklung durchlaufen wird. Dieses Grundmuster ist in Abbildung 7 dargestellt:

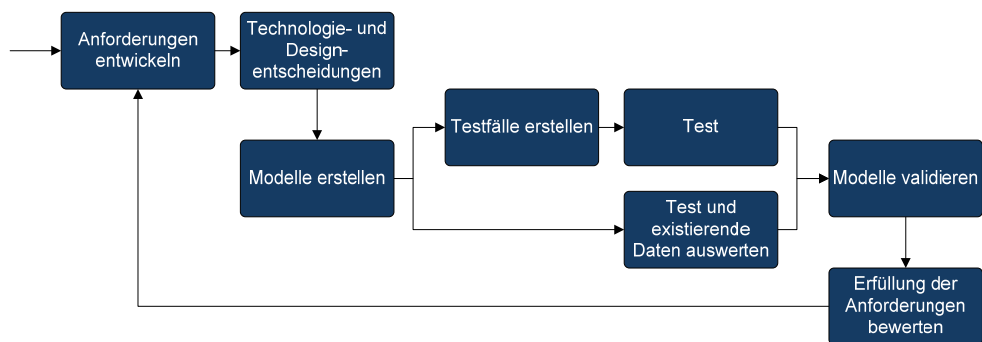


Abbildung 7: Grundmuster der modellbasierten Entwicklung [11]

In frühen Phasen der Konzept- und Anforderungsentwicklung dienen die Modelle der Dokumentation und Entscheidungsfindung. Spätere, genauere Modelle sind ausführbar und detailliert. Die Vorteile, die genannt werden sind unter anderem:

- Informationsablage in Modellen statt in Dokumenten
- Einfachere Verfolgbarkeit von Anforderungen
- Wiederverwendbarkeit von Modellelementen

- Erleichterte Kommunikation und Navigation in Modellen im Vergleich zu Dokumentenaustausch
- Speicherung von Designentscheidungen direkt im Modell

Eine einführende Betrachtung über modellbasierte Systementwicklungsmethoden ist in [5] enthalten. Der Fokus der hier beschriebenen Methodikentwicklung wird bewusst nicht auf eingebettete Systeme gelegt, sondern auf globalere Systembetrachtungen. Dadurch sollen Anforderungen an eine Bearbeitungsmethodik für die hier betrachteten elektrischen Antriebssysteme identifiziert werden. Eine detaillierte Beschreibung der entsprechend ausgewählten und untersuchten modellbasierten Systementwicklungsmethoden ist in 11.2 enthalten.

Wie die in 11.2 aufgeführte Bewertung zeigt, enthalten die Methoden der modellbasierten Entwicklung viele Elemente, die sich einsetzen lassen um konventionelle Beschreibungs- und Entwurfstechniken zu verbessern oder anzureichern. Um eine geeignete Beschreibung zu definieren, müssen diejenigen Methodenmerkmale und Beschreibungstechniken ausgewählt werden, die für den Anwendungsfall der elektrischen Antriebssysteme am besten geeignet sind. Nach Abbildung 3 müssen zunächst weitere wichtige Einflussfaktoren detailliert beschrieben werden.

2.5 Grundlagen der Systemspezifikation

Das Vorgehen bei der Erarbeitung der Anforderungen an ein System und der Ableitung eines technischen Entwurfs, wird „*Requirements Engineering*“ genannt. Die Anforderungen definieren was gebraucht wird und was das System tun muss um diese Bedarfe abzudecken [12]. Dabei liegen die Schwierigkeiten darin, die richtigen Anforderungen zu finden, Vollständigkeit und Konsistenz herzustellen und eine entsprechende Strukturierung zu definieren. Im Kontext der modellbasierten Entwicklung gilt es die richtigen Modellelemente auszuwählen, den richtigen Abstraktionsgrad zu treffen und eine effiziente Analyse zu ermöglichen. Nach [1] ist ein systematisches Vorgehen in der Anforderungsentwicklung die Basis für:

- Verbesserte Kommunikation
- Produktplanung, Projektplanung und Entwurfsentscheidungen
- Begrenzung der Entwicklungsanstrengungen
- Kostenschätzung und Zeitplanung
- Startpunkt für Entwurf und Implementierung
- Dokumentation und Validierung

Die Anforderungsentwicklung ist nicht mit der Konzeptphase beendet. Vielmehr begleitet sie den gesamten Entwicklungsprozess und die iterativen Entwurfsphasen. Gerade deshalb ist die Qualität und Aussagekraft der verwendeten Spezifikationsmodelle so entscheidend.

2.5.1 Requirements Engineering

Die Entwicklungsphase Requirements Engineering lässt sich nach [10] in fünf Aktivitäten gliedern. Drei davon werden darin als Kernaktivitäten definiert:

- Die Gewinnung von Anforderungen, die sich mit der Frage der Sammlung existierender Anforderungen sowie mit der Entwicklung innovativer Anforderungen beschäftigt[10].
- Die Dokumentation von Anforderungen, die sich mit der Strukturierung der Anforderungen in geeigneten Dokumentationsformaten beschäftigt. Diese können Dokumente in natürlicher Sprache oder Modelle sein. Aufgabe der Dokumentation ist außerdem die Sammlung von Begründungen, Entscheidungen und weiteren wichtigen Informationen [10].
- Die Herstellung von Übereinstimmung zu den Anforderungen, die sich mit der Identifikation und Auflösung von Konflikten über die bekannten Anforderungen beschäftigt[10].

Als Querschnittsaufgaben werden ferner die folgenden Aktivitäten definiert:

- Die Validierung der Anforderungen, die das Ziel hat, Fehler in Anforderungen zu entdecken. Diese Fehler können die Anforderungsgewinnung, die Dokumentation oder die Übereinstimmung betreffen [10].
- Das Anforderungsmanagement, das sich mit der Ablage der Anforderungen in einer Datenbank, mit der Priorisierung sowie dem Konfigurations- und Änderungsmanagement von Anforderungen beschäftigt. Zusätzlich zählt zu dieser Aufgabe die Planung von Aktivitäten und die Beobachtungen von Änderungen des Systemkontextes [10].

Die klassischen Lebenszyklusmodelle in 2.4.1 fassen das Requirements Engineering als abgeschlossene, dem eigentlichen Entwurf vorgelagerte Phase auf. Diese Vorgehensweise ist für die hier interessierende Aufgabe wenig geeignet und deckt sich nicht mit den in 2.4.4 vorgestellten modellbasierten Systementwicklungsmethoden. Die iterative, permanente Pflege der Systemmodelle muss auch auf einer Spezifikation beruhen, deren Modelle gepflegt und aktualisiert. Ein dokumentenzentrierter Ansatz ist dazu nicht geeignet. Die Detailschärfe der Spezifikation muss in einer Datenbank und in einer geeigneten Modellnotation stetig weiter erhöht werden. Ein solches Vorgehen deckt sich mit Ansätzen, wie sie in [10] beschrieben werden. Sie sind in der Systementwicklung von Antriebssystemen bislang nur teilweise realisiert. Es ergeben sich aber konkrete Vorteile, die im Rahmen dieser Arbeit auch erschlossen werden. In [10] werden unter Anderem genannt:

- Fortlaufende Weiterentwicklung einer Wissens- und Anforderungsbasis
- Anforderungen sind immer aktuell, der Entfall von Analyseschritten bei Folgeprojekten reduziert die Entwicklungszeit
- Projektübergreifende Wiederverwendung von Anforderungen, Komponenten, Softwaremodulen, Testfällen, etc., wird erleichtert

Das Requirements Engineering ist damit ein zentraler Teil der Konzept- und Entwurfsphasen. In den folgenden Abschnitten werden Elemente einer zielbasierten Anforderungsentwicklung beschrieben und verwendet. Diese Ansätze haben sich für Neuentwicklungen ohne Anforderungsvorgaben etabliert, da durch sie die Intention der Entwicklung erfasst und eine gute Strukturierung der Systemanalyse vorgegeben wird [13].

2.5.2 Zielmodellierung

Als Ausgangspunkt der Anforderungsentwicklung ist ein Zielmodell sinnvoll. Ein Ziel ist nach [10] die „*Beschreibung eines charakteristischen Merkmals des zu entwickelnden Systems*“. In einem Zielmodell werden alle Ziele, die das betrachtete System erreichen soll, erfasst. Danach erfolgt eine Zerlegung in immer feinere Unterziele, die die Entwicklungsaufgabe sukzessive weiter ausarbeiten. Dadurch werden einerseits konkrete Anforderungen identifiziert, andererseits können Zielkonflikte früh erkannt werden [14]. Das Zielmodell beantwortet damit die Frage „warum“ ein System gebraucht wird. Die Ziele beschreiben sowohl funktionale Aspekte, also die Leistungen, die das System erbringen soll, als auch nicht-funktionale Aspekte. Diese sind Randbedingungen und Qualitätseigenschaften wie Zuverlässigkeit, Sicherheit, etc. In einem Zielmodell kann direkt erfasst werden, mit welchen Produktmerkmalen diese Ziele erreicht werden können [13]. Als Vorteile lassen sich festhalten:

- Die Erfassung der Intention der Entwicklung
- Verfolgbarkeit von Anforderungen
- Erhöhte Vollständigkeit der Anforderungen
- Identifikation von Widersprüchen zwischen Produktmerkmalen und Anforderungen

Zur Darstellung und Erzeugung von Zielmodellen gibt es eine Reihe von Notationen, die in [15] beschrieben werden. In aller Regel handelt es sich aber um Blockdiagramme, die in Baumstruktur verfeinert werden. Dabei werden Blöcke mit UND/ODER-Beziehungen verknüpft. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel eines Zielbaums mit Blockelementen der SysML/UML aus [16], da in den folgenden Abschnitten ebenfalls Elemente dieser Beschreibungsnotation verwendet werden. In dem Beispiel in Abbildung 8 ist die Zerlegung eines abstrakten, qualitativen Ziels (Kundenzufriedenheit (customer satisfaction)) in quantitative Ziele (im Beispiel links: Füllrate (fill rate)) dargestellt. Quantitative Ziele sind konkrete, technische Eigenschaften, die mit Anforderungen numerisch beschrieben werden können (Im Beispiel links: Zielfüllrate von 95 %).

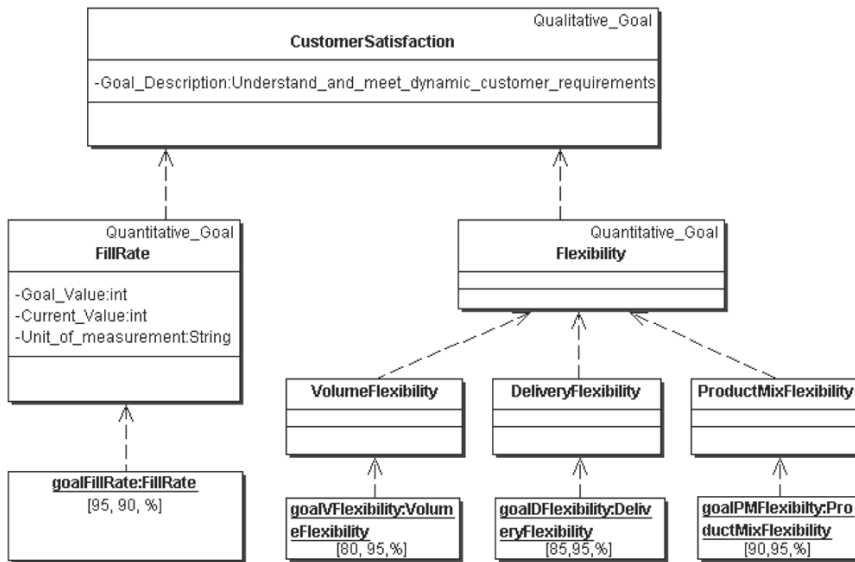


Abbildung 8: Beispiel für Zielmodell in SysML/UML-Notation [16]

Auf diesem Weg erfolgt eine Herleitung quantifizierbarer Anforderungen zu qualitativen Zielen. Damit ist die Verfolgbarkeit der Anforderungen bis hin zu konkreten Entwurfsentscheidungen hergestellt. Nach [13] ist die Zielerlegung darüber hinaus auch eine geeignete Technik um eine ausreichende Vollständigkeit der Anforderungssammlung zu gewährleisten.

Gerade für technische Anwendungen kann man zusätzliche Parameter für Grade der Zielerreichung einführen. Eine solche Technik wird in [17] verwendet. Dafür wird einer Reihe von Zielen eine Zielfunktion mit entsprechenden Variablen zugeordnet. Die Zielfunktionen werden für übergeordnete Ziele kombiniert. Dadurch lässt sich eine numerische Bewertung durchführen, wenn beispielsweise auf der unteren Anforderungsebene verschiedene Konzepte verglichen werden.

Die einfache Notation, die Formulierung in natürlicher Sprache und die weiteren aufgeführten Vorteile, machen die Zielmodellierung für die Spezifikation des elektrischen Antriebsstrangs zu einem sehr gut geeigneten Einstiegspunkt.

2.5.3 Use-Case-Modellierung

Mit Anwendungsfällen (Use-Cases) werden die Interaktionen aller externen Nutzer mit dem System beschrieben. Use-Cases wurden in den sechziger Jahren von Ivar Jacobson zur Beschreibung funktionaler Softwareanforderungen eingeführt[18]. Bei der Definition von Use-Cases stehen die genaue Abfolge der Interaktion und die Reaktion des Systems im Vordergrund. Ein Use-Case ist damit die erste Verhaltensbeschreibung, die bei der Systemspezifikation erstellt wird (Anmerkung: Ein Lastprofil, wie etwa ein Fahrzyklus ist deshalb kein Use-Case, da dort kein Systemverhalten beschrieben wird, sondern lediglich eine dynamische Lastanforderung). Nach [19] ist ein Use-Case die Interaktion eines Akteurs mit einem System, an dessen Beginn eine auslösende Aktion (Trigger) stattfindet und an dessen Ende ein definiertes Ergebnis steht. Ein Akteur ist nach [19] eine Rolle die mit dem System interagiert. Diese Rolle kann von Personen oder Systemen angenommen werden und liegt außerhalb der Systemgrenze. Use-Cases werden üblicherweise in Textform geschrieben. Sie enthalten unter anderem die folgenden Elemente [18]:

- Akteur: Die Person oder das System, welches die Interaktion auslöst
- Umfang: Welcher Teil des Systems wird beschrieben?
- Vorbedingung/Startzustand: Was gilt vor Durchlauf des Use-Case?
- HauptablaufszENARIO: Die Schrittfolge (Eventkette) von Nutzeraktionen und Systemreaktionen
- Nebenszenarien: Eventuelle Erweiterungen oder Verzweigungen der Schrittfolge
- Endzustand: Was gilt nach dem Durchlauf des Use-Case?

Als Beispiel für einen Use-Case kann man den Warmstart des Brennstoffzellenantriebsstrangs nennen. In Tabelle 1 werden alle geforderten Elemente ausformuliert.

Name	Warmstart
Akteur	Fahrer
Eventkette	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fahrer betätigt die Bremse(optional) 2. Fahrer betätigt die Startfunktion und löst Hochlauf aus 3. System meldet Warmstart-Bedingungen 4. System fährt hoch 5. System meldet eingeschränkte Betriebsbereitschaft (nach ausreichender Verfügbarkeit einer Energiequelle) und erteilt eingeschränkte Fahrfreigabe 6. System vollendet Hochlauf und meldet uneingeschränkte Betriebsbereitschaft und erteilt uneingeschränkte Fahrfreigabe
Vorbedingung	Systemhochlauf ist freigegeben (OBD-Checks bestanden, Kein Wasserstoff detektiert); Warmstart-Bedingungen erkannt
Nachbedingung	Fahrfreigabe erteilt, Antriebssystem ist für den vollen oder einen eingeschränkten Betriebsbereich freigegeben

Tabelle 1: Use-Case-Formulierung am Beispiel des Warmstarts

Die umfangreiche Erfassung geforderter Systeminteraktionen macht die Use-Case-Modellierung zu einem wertvollen Werkzeug bei der Identifikation funktionaler Anforderungen. Zusätzlich wird eine Beschreibung aller Systemschnittstellen erzeugt und die Grundlage für eine Verhaltensbeschreibung des Systems gelegt, die weit über eine einfache Vorgabe von Lastzyklen hinaus geht.

2.6 Grundlagen der Funktionsmodellierung

In der systematischen Produktentwicklung ist die Analyse der Produktfunktionen der erste Entwurfsschritt nach Festlegung der Anforderungen. Eine Funktion ist nach [20] der allgemeine, gewollte Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems. Die Funktion beschreibt also direkt den Zweck eines Systems. Eine Gesamtfunktion kann dabei in Teilfunktionen aufgegliedert werden. Dabei wird eine Funktionsstruktur erzeugt, die das Produkt vollständig beschreibt und im Entwurfsprozess bei der systematischen Lösungssuche unterstützt [20]. Umsatzgrößen der Funktionsdefinitionen sind Datenfluss, Materialfluss oder Energiefluss. Abbildung 9 zeigt ein Beispiel für eine solche Funktionsstruktur für den Geber eines Messgeräts:

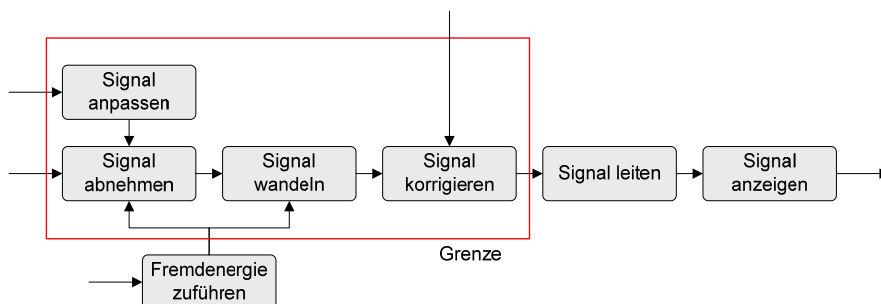


Abbildung 9: Beispiel für ein Funktionsmodell nach [20]

Nach [21] ist ein Funktionsmodell eine abstrakte Basis, die auf eine frühe Festlegung auf Lösungen und Lösungsprinzipien verzichtet. Die systematische Variation eines Funktionsmodells ermöglicht bei diesem Ansatz die Suche nach unterschiedlichen Produktalternativen. Teilfunktionen können nach der Zerlegung auf verschiedene Arten zu größeren Funktionseinheiten zusammengefasst werden. Dabei werden Gruppen erzeugt, wie die in Abbildung 9 dargestellte Grenze. Dadurch wird eine grundlegende Systemarchitektur festgelegt.

Zur Betrachtung von Systemen mit hohem Softwareanteil ist eine Beschreibungsform nötig, die es ermöglicht Funktionen physikalischer Bauteile und Softwarefunktionen in einem Modell zu beschreiben. Für die Beschreibung von Funktionen als Transformation von Energie-, Stoff- oder Signalflüssen gibt es eine Reihe bekannter Notationen. Diese wurden hier verglichen und bewertet. Die untersuchten Notationen sind in Tabelle 2 gegenüber gestellt. Details und Abbildungsbeispiele kann man 16.5 entnehmen.

Modellnotation	Vorteile	Nachteile
Umsatzorientierte Funktionsmodellierung	<ul style="list-style-type: none"> • Intuitiv verwendbar • Übereinstimmung mit klassischen Produktentwicklungsansätzen • Darstellung von Kontroll-, Signal- und Materialflüssen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine hierarchische Darstellung • Eher Analysenotation als Designnotation
IDEF0 (Integration Definition Function Modeling)	<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung von Kontroll- und Signalflüssen • Hierarchien darstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschränkung auf prozessorientierte Systeme • IDEF-Familie stark auf Softwaremodelle ausgerichtet
FFBD (Functional Flow Block Diagram)	<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung logischer Abhängigkeiten • Hierarchien darstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschränkung auf sequenzorientierte Modellierung
EMR (Energetic Macroscopic Representation)	<ul style="list-style-type: none"> • Physikalische Wirkketten gut geeignet für Regelungsentwurf 	<ul style="list-style-type: none"> • Zu starker Fokus auf Energiewandlungsketten und Physik • Keine hierarchische Darstellung
SysML (Systems Modeling Language)	<ul style="list-style-type: none"> • Reiche Beschreibungssprache für Analyse, Design, Verifikation • Hardware- und Softwareanteile • Erfassung von Bezügen zu Anforderungen oder Designentscheidungen direkt im Modell 	<ul style="list-style-type: none"> • Vielzahl an Diagrammarten, angepasste Auswahl ist zu treffen

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Notationen zur Funktionsmodellierung

Zur Auswahl einer geeigneten Beschreibungsnotation zur Modellierung des Antriebssystems wurden die folgenden Randbedingungen definiert, die im Einklang mit der Systemdefinition in 2.2 stehen:

- Mögliche Bearbeitung von MIMO-Systemen (Multiple Input Multiple Output)
- Möglichkeiten zur algorithmischen Bearbeitung von Funktionsnetzen zur Netzwerkanalyse
- Gemeinsame Modellierung von Hardware- und Softwareanteilen
- Erleichterung der Identifikation von Wirkketten und Fehlerketten
- Nachverfolgbarkeit des Funktionsursprungs (Speicherung von Designentscheidungen)

Nach den dargestellten Vergleichskriterien wird für die Verwendung in dieser Arbeit die SysML als Beschreibungsnotation für die Funktionsmodellierung ausgewählt. In nachfolgenden Abschnitten werden daher die SysML detaillierter beschrieben und die verwendeten Modellelemente vorgestellt.

2.6.1 Der Architekturbegriff in der Systementwicklung

Die Architektur eines Systems ist eine formalisierte Darstellung, welche die Komponenten (Systemfunktionen und/oder physikalische Komponenten) und deren Abhängigkeiten untereinander darstellt. Diese Darstellung ist relevant als variantenunabhängiger Plan, der als Grundlage für die Realisierung mechatronischer Systeme dient. Bei der Strukturierung der Produktfunktionen zu Subsystemen wird noch von Hardware- oder Softwarerealisierungen abstrahiert. Die funktionale Architektur ist damit die Auflistung aller Produktfunktionen, deren Vernetzung und Abhängigkeiten, sowie deren Gruppierung in sinnvolle Subsysteme. Dadurch ergibt sich auch zwingend die Spezifikation von internen und externen Schnittstellen der Subsysteme, sobald diese mit Lösungsansätzen belegt werden. Abbildung 10

zeigt, wie sich die Funktionsmodellierung in die Ablaufschritte der Konzeptdefinition nach [20] eingliedert:

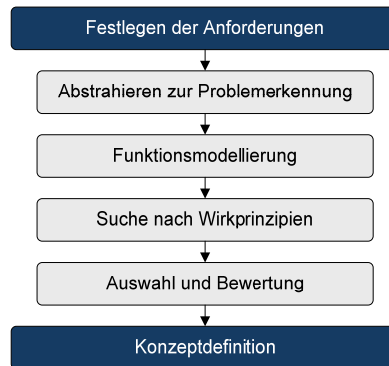


Abbildung 10: Schritte des Konzeptentwurfs nach [20]

Der Architekturentwurf würde sich in dieser Darstellung am Ende der Funktionsmodellierung einordnen. Für Systeme, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, muss diese Ablaufkette um weitere Elemente erweitert werden. Insbesondere in der Strukturierung der Funktionen zu einer Systemarchitektur muss die gemeinsame Betrachtung von physikalischen Systemen und eingebetteten Softwareanteilen berücksichtigt werden. Die physikalische Identifikation von Wirkprinzipien muss zwar stattfinden, darüber hinaus müssen aber die Beschreibung des logischen Systemverhaltens und die Identifikation von Steuerungsabläufen möglich sein. Die Systemarchitektur muss demnach aus mehreren Teilarchitekturen definiert werden. Für die nachfolgenden Spezifikations- und Entwurfsschritte wird hier eine Hierarchie mehrerer Entwurfssichten definiert:

Definition: Die Funktionsarchitektur setzt sich aus der physikalischen Architektur und der Prozessarchitektur zusammen. Diese Architekturen werden vollständig beschrieben durch eine Modellierung in vier Sichten: Ablaufmodelle, Zustandsautomaten, physikalische Topologien und die Elektrik/Elektronik-Architektur (E/E).

Def. 1

Die Zusammensetzung der so beschriebenen Funktionsarchitektur wird in Abbildung 11 dargestellt. Die vier Entwurfssichten werden in nachfolgenden Kapiteln detailliert erläutert. Die Kommentarsymbole in Abbildung 11 zeigen die anwendungsspezifischen Inhalte, die für den Konzeptentwurf des Antriebssystems verwendet werden.

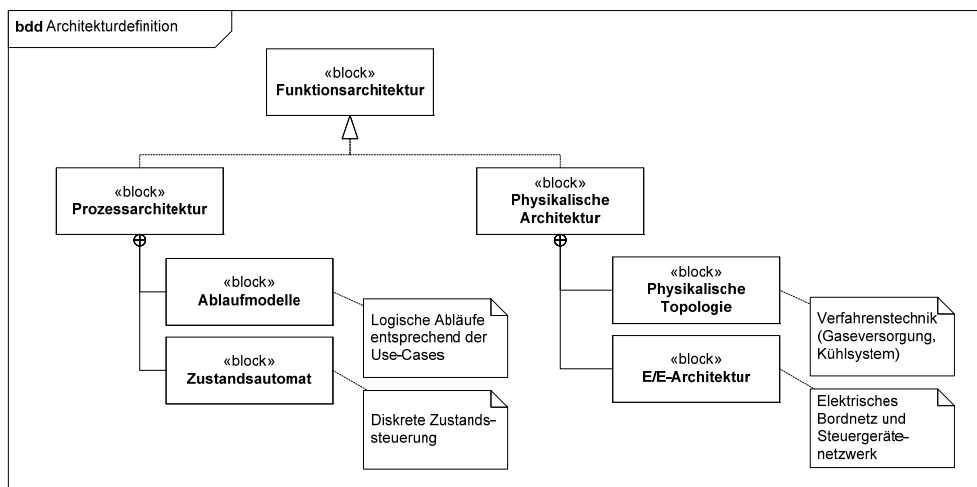


Abbildung 11: Elemente der hier verwendeten Architekturbeschreibung und ihre Hierarchie

Die gewählte Struktur ist angelehnt an [19] und [22]. Weitere Definitionen finden sich beispielsweise in [23]. Die in [22] beschriebene Trennung in „asset development“ und „product development“ ist gleichwertig mit der Trennung zwischen Plattformentwicklung und darauf aufsetzender Produktentwicklung. Der Begriff der Plattform und der darauf aufsetzenden Produktvarianten ist für den hier erarbeiteten Entwurfsansatz zentral. Für Softwareinhalte gilt in diesem Zusammenhang der Begriff der Produktlinie [22], [24]. Nach [25] lässt sich nur mit einer modularen Produktstruktur eine hohe Variantenvielfalt realisieren. Dazu werden Plattformmodule und variantenabhängige Module kombiniert. Außerdem liefert die Entwicklung der Produktarchitektur vor dem Produktentwurf eine erhöhte Stabilität, da die Schnittstellen zwischen den Systemanteilen bekannt sind und die Effekte von Änderungen analysiert werden können. Dies ist insbesondere bei Neuentwicklungen von Vorteil.

Nach [25] reduziert sich durch die Architekturdefinition auch der Kommunikations- und damit der Dokumentationsbedarf. Dies ist insbesondere für effiziente modellbasierte Entwurfsmethoden von Vorteil. Eine der Grundmotivationen dieser Arbeit ist eine architekturbasierte Plattformspezifikation zu entwickeln, die eine hohe Abdeckung von Produktvarianten ermöglicht. Daher wird der Architekturherleitung gemäß Def. 1 und der Bildung einer modularen Produktstruktur hier besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Ein zentrales Ziel der Funktionsmodellierung ist die Herleitung dieser modularen Produktstruktur. Ist der Systemzweck erst einmal über die Funktionsanalyse definiert, liefert eine modulare Systemaufteilung die Grundlage für die Spezifikation der Subsysteme und die Definition von Plattformkomponenten.

2.6.2 Modularität und Produktfamilien

Mit den Vorteilen modularer Produktstrukturen und den Techniken zu ihrer Entwicklung, haben sich bereits eine Fülle von Autoren beschäftigt. Die unterschiedlichen Definitionen von Systemmodularität werden in [26] in einer umfangreichen Übersicht verglichen. Von zentraler Bedeutung sind die Konzepte der Funktionsstrukturierung, der Standardisierung von Schnittstellen und der schwachen Kopplung. Letztere zielt darauf ab, alle Systemabhängigkeiten zu identifizieren und Module so anzuordnen, dass geringe Abhängigkeiten zwischen Modulen bestehen. Als Vorteile einer modularen Produktstruktur beschreibt [27] schnelle Entwicklungszeiten, effiziente Verbesserung und Wiederverwendung der Module, Komplexitäts- und Kostenreduktion sowie ein verbessertes Wissensmanagement.

In [28] wird die Modulbildung verwendet um Interaktionen zwischen Systemteilen zu verstehen und Entwicklungsteams aufzubauen. Dadurch soll der Entwicklungsprozess vereinfacht werden. Die Spezifikation von Subsystemen und Schnittstellen ermöglicht neben parallelen Entwicklungen auch die Beauftragung von Lieferanten für Teilsysteme. Diesen wichtigen Aspekt der Lieferanteneinbindung untersucht [29] in einer empirischen Studie. Im Zusammenhang mit der Definition von Produktplattformen und Variantenabdeckungen steht der Begriff der „mass customization“. Den Einfluss der Produktstrukturierung auf die Fähigkeit, eine Vielzahl von Varianten aus Grundmodulen zu erstellen, beschreibt [30]. Ebenfalls relevant für jede Entwurfsmethodik ist auch der Aspekt der frühen Kostenschätzung. Funktionskosten und die Kosten der Module für verschiedene Funktionsgruppierungen analysiert [31]. Darüber hinaus können Teile der Kosten der Wertschöpfungskette den Elementen der Produktarchitektur zugeordnet werden. Dies ermöglicht einen Vergleich von Logistikkosten für verschiedene Produktstrukturierungen und Varianten. Ein Verfahren, um die Bildung der Module direkt auf Basis der Logistikkosten durchzuführen beschreibt [32].

Die Bewertung von Subsystemzielkosten im Sinne einer Funktionskostenanalyse wird in dieser Arbeit als Teil der Architekturdefinition durchgeführt.

2.6.3 Identifikation modularer Produktstrukturen

Zur Herleitung und Bewertung einer modularen Systemarchitektur existieren in der Literatur verschiedene Ansätze. Dabei kann man grundsätzlich zwischen

- heuristischen, regelbasierten Verfahren und
- algorithmischen, automatisierten Verfahren

unterscheiden. Ein auf Heuristiken beruhendes Verfahren wird in [33] beschrieben. Dabei werden in einem vernetzten Funktionsmodell Hauptflüsse und Nebenflüsse von Energie- oder Materialströmen identifiziert. Außerdem werden Elemente, die zu einem Energiewandlungsschritt gehören, zusammengefasst. Diese Regeln definieren damit eine Strukturierungsgrundlage. Abbildung 12 zeigt ein Beispiel für drei Funktionselemente, die auf diese Art und Weise zusammengefasst werden.

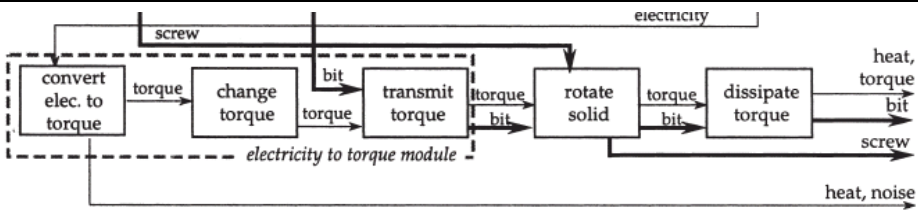


Abbildung 12: Gruppierung von Funktionselementen in [33]

Die regelbasierte Gruppierung ist allerdings nur für Systeme geeignet, die eine geringe Anzahl an Funktionen aufweisen. Außerdem sind die verschiedenen Heuristiken nicht widerspruchsfrei. Die gebildeten Module unterscheiden sich deutlich. Damit ist die Methodik auch nicht einfach automatisierbar.

Im Gegensatz dazu gibt es Ansätze, die eine rein rechnerische Architektursynthesen ermöglichen sollen. Ein Verfahren, bei dem ein Komponentennetzwerk mit einer Reihe von Zwangsbedingungen versehen wird, beschreibt [34]. Bei diesen Bedingungen handelt es sich um Attribute von Netzwerken, wie Zwangsverbindungen, Beschränkungen für die angeschlossene Elementanzahl oder Elementketten, die gebildet werden müssen. Die Sammlung von Komponententypen, Verbindungstypen und Zwangsbedingungen wird Schema genannt. Ein Komponentennetzwerk kann mithilfe eines solchen Schemas beispielsweise mit Suchalgorithmen („*state space search*“) zu einer Produktstruktur verarbeitet werden. Ein solches Verfahren ist prinzipiell geeignet zur Anwendung für Brennstoffzellensysteme. Allerdings zeigen die in [34] beschriebenen Anwendungen eine relativ geringe Anzahl mechanischer Komponenten. Für eine Bearbeitung des hier erstellten komplexen Funktionsmodells würde die Bearbeitung mit Suchverfahren wie der Tiefensuche („*Depth First Search*“) rechnerisch zu aufwändig.

Eine Vielzahl rechnerischer Ansätze beruht auf matrixbasierten Algorithmen. Dabei wird ein Funktionsnetzwerk in Matrixdarstellung repräsentiert. Jede Interaktion zwischen Komponenten wird dabei als Matrixeintrag dokumentiert. Ein Sortieralgorithmus kann die Zeilen der Matrix so verändern, dass Modulstrukturen erkennbar werden. Für diese Art von Verfahren gibt es eine Vielzahl bekannter Sortieralgorithmen sowie Ansätze um die Verbindungen der Elemente zu bewerten. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die Arbeiten von [28]. Die matrixbasierten Verfahren sind interessant, da im Zusammenhang mit Funktionsnetzwerken bereits Graphen- bzw. Matrixdarstellungen erzeugt wurden. Die Bearbeitung dieser Matrizen ist in die Werkzeugkette direkt integrierbar.

Eine weitere Möglichkeit der Identifikation modularer Strukturen ist die Gruppierung mit Clusteralgorithmen. Genetische Algorithmen verwenden [35], [36] und [37]. Für die hier beschriebene Anwendung (Antriebssystem mit Brennstoffzellen) ist eine solche Lösung zu aufwändig. Allerdings verwendet [35] eine Interaktionsmatrix mit Gewichtungen und keine reine Binärmatrix. So etwas ist auch hier sinnvoll. Einen auf einer nicht-binären Matrix beruhenden Algorithmus, beschreibt ebenfalls [38]. Eine umfassende Liste von Kriterien zur Modulbildung enthält [37]. Diese können zur Bewertung der Kandidatenarchitekturen herangezogen werden. In [36] wird das zentrale Kriterium der starken, modulinternen Interaktion und der schwachen, modulexternen Interaktion beschrieben und mit einer Kennzahl bewertet. Standard-Clusteralgorithmen werden in [39] verwendet. Ein solcher Ansatz ist aufgrund der geringeren Komplexität vielversprechend.

Der Methodenüberblick zeigt, dass eine funktionale Architektur auf verschiedenste Art und Weise aus einer Funktionsstruktur erzeugt werden kann. Auf der Basis einer vernetzten Funktionsstruktur lässt sich eine umfangreiche Netzwerkanalyse durchführen. Den bei der Vernetzung aufgebauten Graphen, dessen Knoten die Funktionen repräsentieren, kann man mit einem geeigneten Algorithmus in Untergruppen aufteilen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Anwendung von

- Clusteralgorithmen sowie
- matrixbasierten Sortieralgorithmen

erprobt. Eine algorithmische Bearbeitung der Funktionsnetzwerke bietet bei relativ geringem Implementierungsaufwand eine einfache und schnelle Verarbeitung von Funktionsnetzwerken. Ein genauer Überblick über die Grundlagen der Clusterungsverfahren und matrixbasierter Algorithmen kann 14 entnommen werden. Zur späteren Auswahl eines geeigneten Verfahrens ergibt sich für die

Clusteralgorithmen eine hohe Bedeutung des Ähnlichkeitsmaßes, mit dem die Zugehörigkeit eines Punktes zu einer Menge bewertet wird. Dieses Detail erfordert daher bei der späteren Implementierung besondere Aufmerksamkeit. Für die vergleichende Untersuchung eines matrixbasierten Sortieralgorithmus wird nach den in 14.2 dargestellten Grundlagen ein Verfahren mit integrierter Modulbewertung nach [40] erprobt. Weitere Details werden in späteren Abschnitten zur Implementierung vorgestellt.

2.6.4 Modellierung des Systemverhaltens

Die Modellierung des Systemverhaltens ist ein Kerngebiet der Systementwicklung und ein wichtiges Bindeglied für den späteren Entwurf der Kontrollsoftware. Die Verhaltensmodellierung beschreibt nach [14] das zeitliche Verhalten eines Systems und die Abbildung von Eingabedaten auf Ausgabedaten. Ein Verhaltensmodell ermöglicht damit die Simulation und Verifikation der Systemabläufe. Nach [19] kann eine Verhaltensmodellierung auf allen Ebenen der Entwicklung angewendet werden, vom Geschäftsprozess über Use-Case-Abläufe bis hin zu detaillierten Beschreibungen von Algorithmen und Operationen.

Dieser Verhaltensbegriff sollte von der Verwendung im Kontext der konventionellen Produktentwicklung abgegrenzt werden. In diesem Kontext wird das Konzept Funktion-Verhalten-Struktur von John Gero verwendet, das in [41] beschrieben wird. Dabei wird eine Funktion in ein Verhalten übersetzt. Aus dem Verhalten wird dann eine Struktur abgeleitet, die dieses Verhalten aufweist. Der Verhaltensbegriff ist dabei relativ vage gehalten und ist ein Konzept, das die Brücke zwischen Funktion und Struktur schließen soll. In verwandten Ansätzen wird der Verhaltensbegriff oft mit der Wirkung physikalischer Gesetzmäßigkeiten gleichgesetzt. Als Ziel der Verhaltensmodellierung nennt [42] die Identifikation von Gleichungen, die das Verhalten mathematisch beschreiben. Verhalten ist nach ihrer Definition entweder ein Fluss von Input zu Output (Energie, Material oder Signal) oder eine physikalische Zustandsänderung. Verhalten wird demnach als Sammlung von Verhaltensprozessen modelliert, die miteinander verbunden werden. Der relevante Unterschied zu [41] ist die Nennung des Zustandsbegriffs. Eine Verhaltensbeschreibung über Prozessketten wird ebenfalls in [43] erzeugt. Ihre Zuordnung zu Funktionen erfolgt über die Input- und Outputgrößen, wie in Abbildung 13 dargestellt. Ein Verhalten (a) wird darin über die Zusammenwirkung mehrerer Funktionen (b) beschrieben.

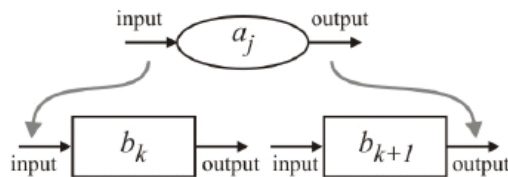


Abbildung 13: Kopplung von Funktionen und Verhaltensketten aus [43]

Die Verhaltensblöcke dienen auch hier der Definition physikalischer Gesetzmäßigkeiten. Allerdings ist die Kopplung über die Ein- und Ausgabegrößen des Funktionsmodells auch auf softwarehaltige Systeme übertragbar.

Parallelen sind erkennbar, wenn man Elemente der Softwaremodellierung und die Betrachtung von Zuständen hinzu zieht. Den expliziten Vergleich zwischen Elementen der Softwareentwicklung und dem Funktion-Verhalten-Struktur Rahmenwerk zeigt [44]. Erwartetes Systemverhalten wird dabei als Ablaufmodell definiert. Die Strukturdimension eines Softwaresystems wird mit späteren Analysen wie der Ablaufkoordination gleichgesetzt. Die Spezifikation von Systemabläufen für das hier betrachtete Brennstoffzellen-Antriebsystem wird sich an ähnlichen Strukturen aus logischen Ablaufmodellen anlehnen.

2.6.5 Verwendete Modellelemente

In dieser Arbeit wird eine modellbasierte Spezifikation für einen Antriebsstrang mit Brennstoffzellen erstellt. Für die Modellierung von Funktion, Struktur und Verhalten werden nach dem Notationsvergleich in 2.6 Elemente der Modellierungssprache SysML (Systems Modeling Language) verwendet. Die Elemente, die für die Spezifikation des Antriebsstrangs verwendet werden, werden im

Folgenden vorgestellt. Zur Erläuterung werden Beispielmodelle zur Beschreibung eines SUV-Fahrzeugs verwendet, die der SysML-Spezifikation [45] entnommen sind.

2.6.5.1 Anforderungen und Use-Cases

Anforderungen an ein System lassen sich, wie eingangs erwähnt, in funktionale Anforderungen und nicht-funktionale Anforderungen unterteilen. Funktionale Anforderungen werden entweder aus Anwendungsfällen (Use-Cases) abgeleitet oder direkt als Anwendungsfälle definiert. Nicht-funktionale Anforderungen umfassen alle Qualitätsattribute und sonstigen Randbedingungen. Um Anforderungen und deren Struktur darzustellen, verfügt die SysML über einen eigenen Diagrammtyp, das „Requirements-Diagramm“ (Anforderungsdiagramm). Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt aus einem Beispiel aus [45]. Es zeigt eine hierarchische Zerlegung von Anforderungsgruppen und ein Beispiel für eine Anforderung mit Text und Identifikationsnummer:

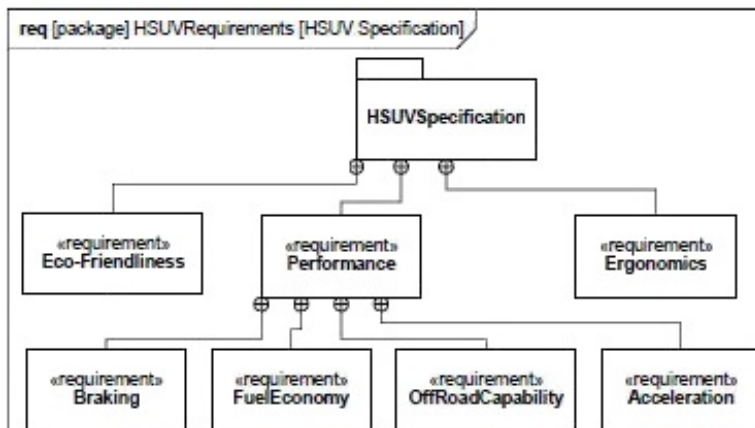


Abbildung 14: „Requirements-Diagramm“ für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [45])

Anwendungsfälle werden in einem eigenen Diagramm dargestellt, dem „Use-Case-Diagramm“ (Anwendungsfalldiagramm). Dieses zeigt die Systemgrenze (Systemkontext), die beteiligten Akteure (Personen oder wechselwirkende Systeme) und die Anwendungsfälle selbst. Abbildung 15 zeigt einen Ausschnitt aus einem Beispiel aus [45]:

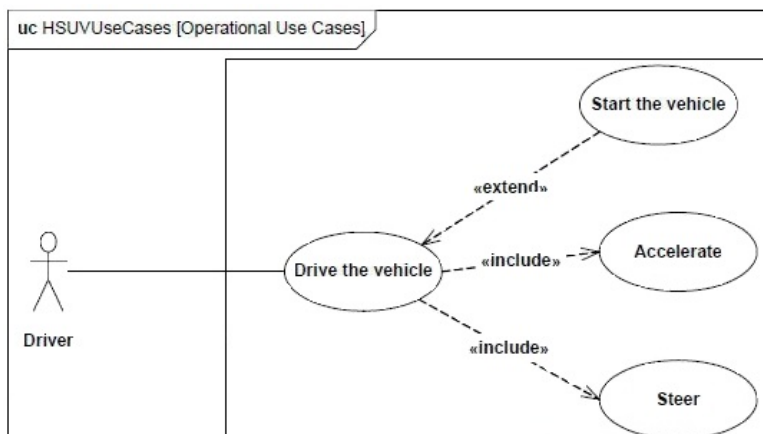


Abbildung 15: „Use-Case-Diagramm“ für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [45])

Es zeigt den Fahrer als Akteur und seine möglichen Interaktionen mit dem Fahrzeug, wie „Fahren“. Diese sind mit Beziehungsfeilen noch feiner zerlegt.

Alle SysML-Elemente verfügen über eine Vielzahl möglicher Beziehungen. Im Bereich der Anforderungen sind dies beispielsweise die Ableitungsbeziehung <<deriveReq>>, die Erfüllungs-

beziehung <<satisfy>> oder die Verifikationsbeziehung <<verify>>, mit der sich Testfälle erfassen lassen. Für die Use-Case-Diagramme gibt es Beziehungen wie die Einschlussbeziehung <<include>> oder die Erweiterungsbeziehung <<extend>>. Alle genannten Elemente dienen dazu Hierarchien und Beziehungen darzustellen.

2.6.5.2 Strukturelemente und -diagramme

In SysML werden alle Strukturen in Systemen durch Blöcke beschrieben. Sie beschreiben ein System als eine Sammlung von Teilen. Ein Block kann detaillierte Informationen (Attribute) enthalten oder die Beziehungen zu anderen Blöcken darstellen [19]. Abbildung 16 zeigt einen Ausschnitt aus einem „Block-Definition-Diagramm“ (Blockdefinitionsdiagramm) für das SUV-Beispiel aus [45]. Dargestellt ist die hierarchische Zerlegung des Fahrzeugs in physikalische Subsysteme:

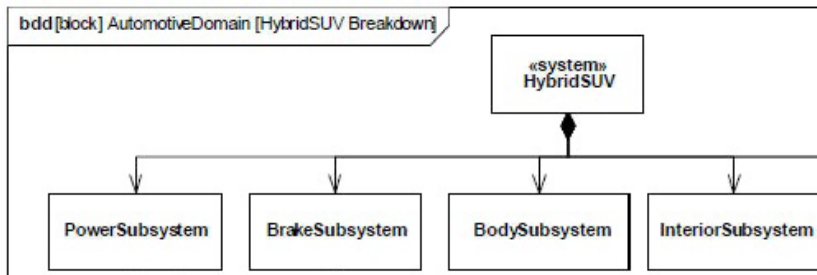


Abbildung 16: „Block-Definition-Diagramm“ für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [45])

Die innere Struktur der Blöcke lässt sich mit weiteren Block-Definition-Diagrammen oder dem „Internal-Block-Diagramm“ (Diagramm interner Bestandteile) weiter verfeinern.

2.6.5.3 Verhaltenselemente und -diagramme

Nach der Definition des Verhaltensbegriffs in 2.6.4 können hier dazu passende Diagramme ausgewählt werden. Verhalten im Sinne eines logischen Ablaufs lässt sich in der SysML/UML durch Aktivitätsdiagramme darstellen. Aktivitätsdiagramme zeigen, was in welcher Reihenfolge passiert und welche Daten dafür benötigt beziehungsweise dabei erzeugt werden [19]. Dabei können Flüsse sich auch verzweigen oder vereinigen. Abbildung 17 zeigt einen Ausschnitt aus einem Beispiel für ein Aktivitätsdiagramm des SUV-Beispiels aus [45]:

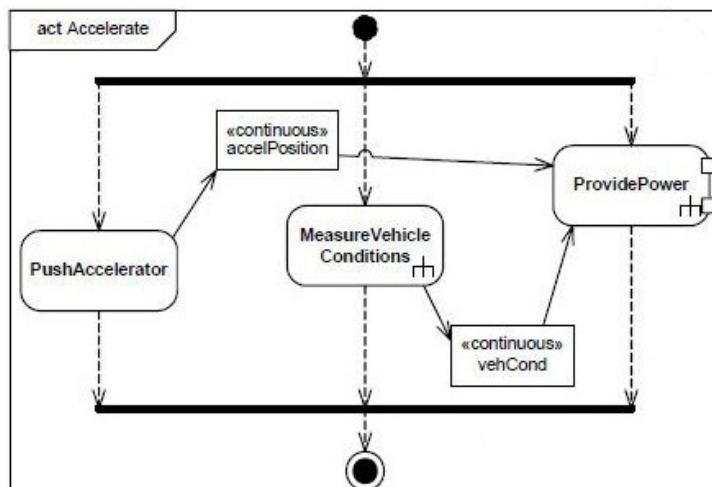


Abbildung 17: „Activity-Diagramm“ für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [45])

In dem Beispiel sieht man drei Systemaktivitäten, die parallel ausgeführt werden und die Ausgaben, die sie erzeugen. Das Aktivitätsmodell der SysML ist nach [19] kompatibel mit der EFFBD-Darstellung, die in 2.6 beschrieben wurde. Die Aktivitätsblöcke sind Behälter. Sie enthalten selbst

einen Ablauf und rufen Aktionen auf, sogenannte „Actions“. Dadurch lässt sich eine konkrete Implementierung beschreiben.

Eine andere Verhaltensbeschreibung sind die „State-Machine-Diagrams“ (Zustandsdiagramme). In diesen werden Zustände, Zustandsübergänge und Aktionen beschrieben. Die dadurch entstehenden Gebilde nennt man Zustandsautomaten. Abbildung 18 zeigt einen Ausschnitt aus einem Beispiel für ein Zustandsdiagramm für das SUV-Beispiels aus [45]:

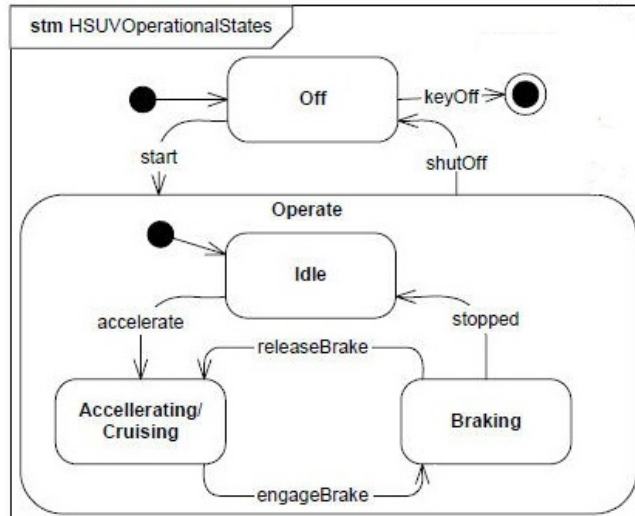


Abbildung 18: State-Machine-Diagramm für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [45])

Zustandsautomaten können Zustände in einem Softwareablauf beschreiben aber auch physikalische Zustände, wie sie bereits in 2.6.4 beschrieben wurden. Das Beispiel zeigt verschiedene Betriebszustände des Fahrzeugs und die Zustandsübergänge. Zustände können hierarchisch angeordnet werden.

Die Verhaltensmodellierung mit Zustandsautomaten oder mit Aktivitätsdiagrammen unterscheiden sich von einander in einigen wichtigen Details, die in [46] beschrieben werden:

Aktivitätsdiagramme	Zustandsautomaten
Prozessorientiert: Reihenfolge von Schritten	Ereignisorientiert: Reaktion auf Ereignisse
Fokus liegt auf den Aktionen während das System etwas ausgeführt	Fokus auf der Wartephase vor einem Ereignis
Aktivitäten verwenden Zustandsinformationen für Entscheidungsknoten	Zustandsautomaten verwenden die Aktivitäten als Beschreibung, was während Zustandsübergängen oder innerhalb von Zuständen passiert

Tabelle 3: Unterschiede zwischen Aktivitätsdiagrammen und Zustandsautomaten [45]

Da nach der Systemdefinition für das Antriebssystem aus Begriffsdefinitionen ein hybrides System mit einer überlagerten Zustandsmaschine spezifiziert werden soll, ist die Ableitung dieser Beschreibung ein wichtiger Entwurfsschritt. Der Zusammenhang zwischen Aktivitätsdiagrammen und Zustandsautomaten wird in späteren Abschnitten bei der Anwendung der Methodik berücksichtigt.

2.7 Grundlagen der Brennstoffzellensysteme

In der vorliegenden Arbeit werden in erster Linie elektrische Antriebssystemen mit Brennstoffzellen betrachtet. Die technischen Eigenschaften und Grenzen dieser Technologie legen eine signifikante Anzahl von Randbedingungen für die Systementwicklung fest. Deshalb ist der Stand der Technik der interessierenden Brennstoffzellensysteme mit Wasserstoff als Energieträger eingehend untersucht worden. Auf Basis dieser Analyse wurden relevante Randbedingungen identifiziert und in Definition und Anwendung der hier behandelten Methodik berücksichtigt.

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die die chemisch gebundene Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie und Wärme wandeln können. Im Unterschied zu Batterien werden die Reaktanden kontinuierlich zugeführt. Für Fahrzeuganwendungen werden in der Regel Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM) verwendet. Daher wird dieser Typ in den folgenden Kapiteln betrachtet.

Eine Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden (Anode und Kathode), die durch eine Elektrolytmembran getrennt sind. Die Membran ist nur für Ionen durchlässig. Dadurch lässt sich eine chemische Reaktion herbeiführen, die in Abbildung 19 dargestellt ist:

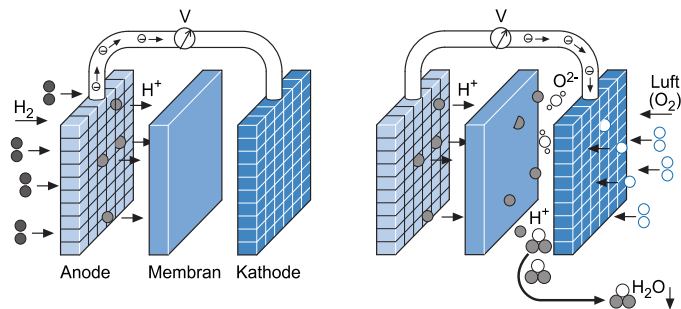
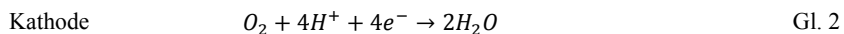
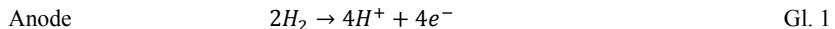
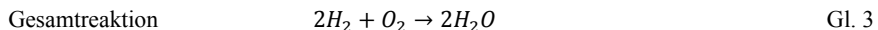


Abbildung 19: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle [47]

An der Anode wird Wasserstoff zu H⁺-Ionen und Elektronen oxidiert. Die H⁺-Ionen können durch die Elektrolytmembran zur Kathode gelangen. Die Elektronen werden über einen äußeren Stromkreis geführt. An der Kathode wird mit den Elektronen der dort zugeführte Sauerstoff reduziert [47]. Die Halbreaktionen lauten:



Die Reaktionsschritte bilden zusammen eine sogenannte kalte Verbrennung, da die Reaktanden räumlich getrennt bleiben [47]:



Die Ausführungen zur Brennstoffzelle sollen hier nicht weiter vertieft werden. Eine ausführliche Erläuterung der einzelnen Komponenten der Brennstoffzelle ist in 12.2 enthalten. Dort werden auch die für den hier betrachteten elektrischen Antriebsstrang resultierenden Besonderheiten und Randbedingungen eingehend beschrieben. Alle Grundlagen des elektrischen Verhaltens und der Besonderheiten der Fahrzeugverwendung sind in 12.3 detailliert beschrieben. Bei der Analyse verschiedener Nutzungsszenarien wird deutlich, dass sich der Entwurf dieser Systeme zwingend an konkreten Nutzungsfällen orientieren muss. Die Funktionalität zur Betriebsführung und zur Vermeidung von Schädigungen muss auf Systemebene definiert und umgesetzt werden. Außerdem muss die gesamte Systemauslegung so robust sein, dass sich Schwankungen der Lastbedingungen und eine Degradation des Zellstapels im Laufe des Fahrzeuglebens nicht übermäßig negativ auswirken. Die Einbindung des Brennstoffzellensystems in den gesamten elektrischen Antrieb wird im Folgenden kurz vorgestellt und in 12.3.2 ausführlich erläutert.

2.8 Grundlagen elektrischer Antriebssysteme

Eine eingehende Analyse der Grundlagen elektrischer Antriebssysteme ist ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit, da sie auf vielfältige Weise Randbedingungen für die angestrebte Methodik für die Spezifikation und den Systementwurf festlegen. Für Elektro- und Hybridfahrzeuge gibt es sehr viele mögliche Antriebstopologien. Hybridfahrzeuge verfügen über eine Kombination aus konventionellem Verbrennungsmotor und einer zusätzlichen elektrischen Antriebsmaschine. Neben den parallelen Hybridantrieben, bei denen zwei Antriebsaggregate parallel auf die gleiche Antriebsmechanik wirken, gibt es auch serielle Hybride. Diese markieren den Übergang zum reinen Elektrofahrzeug, da sie über einen rein elektrischen Traktionsantrieb verfügen [48]. Eine der Energiequellen eines seriellen Hybriden dient nur zur elektrischen Energieerzeugung, die den elektrischen Energiespeicher lädt. Die Antriebsmaschine wird nur aus diesem Energiespeicher versorgt. Abbildung 20 zeigt schematisch ein Beispiel für einen solchen Antrieb in konventioneller Struktur mit Verbrennungsmotor:

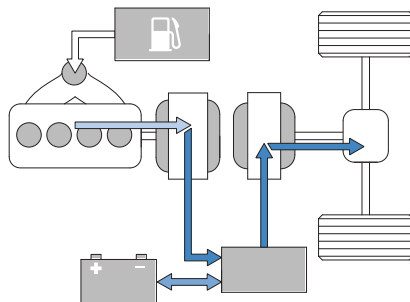


Abbildung 20: Struktur eines seriellen Hybridantriebs mit Verbrennungsmotor (Reif)

Antriebskombinationen aus einem Brennstoffzellensystem und einem Energiespeicher fallen ebenfalls in die Kategorie der seriellen Hybride. Abbildung 21 zeigt die wesentlichen Komponenten der elektrischen Energieversorgung solcher Fahrzeuge.

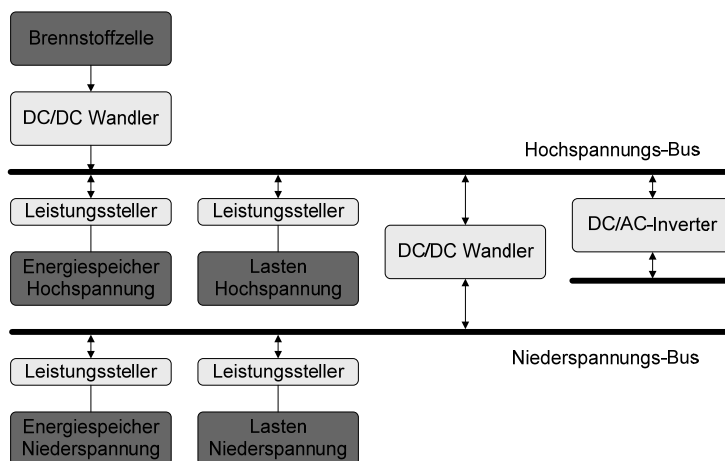


Abbildung 21: Grundstruktur der Energieversorgung eines Elektrofahrzeugs mit Brennstoffzelle [49]

Die im Bild dargestellte Brennstoffzelle kann man auch durch Verbrennungsmotor und Generator ersetzen. Brennstoffzellen sind für die Anwendung in elektrischen Antriebssystemen attraktiv, da sich mit ihrer Hilfe Elektrofahrzeuge mit hoher Reichweite und geringen Tankzeiten realisieren lassen [50]. Die Speicherfunktion einer Batterie können auch Hochleistungskondensatoren (Supercaps) oder mechanische Energiespeicher, wie Schwungräder übernehmen.

In Abbildung 21 werden zwei elektrische Versorgungssysteme dargestellt. An den Hochspannungsbuss werden die Elemente des Traktionsantriebs und Hochspannungsverbraucher angeschlossen. Der Niederspannungsbuss ist das konventionelle 12V-System. An dieses System werden Niederspannungs-

verbraucher und eine Starterbatterie angeschlossen. Der Anteil des Energiespeichers an der gesamten elektrischen Antriebsleistung ist eines der primären Auslegungskriterien. Über diesen sogenannte Hybridisierungsgrad lassen sich die zwei prinzipiellen Topologievarianten der Brennstoffzellenhybride definieren:

- Bei einer schwach hybridisierten Variante wird das Brennstoffzellensystem auf die durchschnittlich erwartete Grundlast ausgelegt. Das Batteriesystem erfüllt die Aufgaben dynamische Lastspitzen abzupuffern und die Rekuperation von Bremsenergie zu ermöglichen.
- Bei einer stark hybridisierten Variante wird das Brennstoffzellensystem als Range-Extender ausgeführt. Dies ist ein kleines, im Stationärbetrieb laufendes System, welches den elektrischen Energiespeicher auflädt. In einer solchen Variante kann das Brennstoffzellensystem in einem günstigen Wirkungsgrad betrieben werden.

Nach [50] ist die niedrig hybridisierte Variante die flexibelste im Hinblick auf Energiemanagement und Betrieb. Geringen Lastschwankungen kann das Brennstoffzellensystem direkt folgen, nur bei starken Beschleunigungen kommt die Batterie zum Einsatz. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur schwach hybridisierte Systeme betrachtet.

Überträgt man die Grundstruktur der Energieversorgung aus Abbildung 21 auf ein Fahrzeug ergibt sich die in Abbildung 22 dargestellte Topologie.

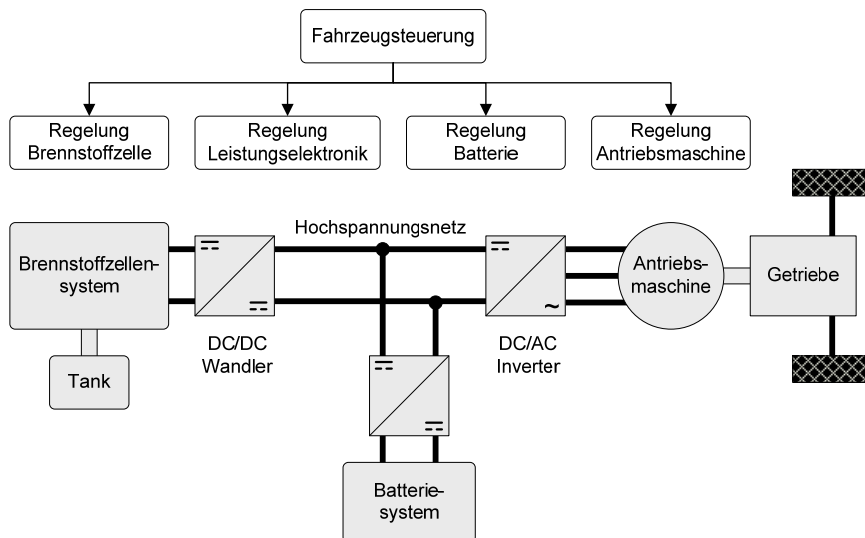


Abbildung 22: Struktur eines elektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle [49]

Der in Abbildung 21 gezeigte Hochspannungs-Bus ist hier als Zwischenkreis zwischen Energiequellen und –senken ausgeführt. Die dargestellten Spannungswandler sind optional. Je nach elektrischer Topologie kann den Energiequellen jeweils ein Wandler vorgeschaltet werden. In Abbildung 22 kann durch die zwei Wandler eine feste Zwischenkreisspannung eingestellt werden. Der Hochspannungsbus ist dadurch von den Spannungsschwankungen der Energiequellen entkoppelt. Im oberen Teil der Abbildung sind die Steuerungsanteile des Antriebssystems angedeutet. Gemäß der Systemdefinition in Begriffsdefinitionen verfügt jede dargestellte Komponente des Antriebssystems über nennenswerte Softwareanteile, welche Betrieb und Regelung ermöglichen und in vernetzten Steuergeräten in das Antriebssystem eingebettet sind. In 13.1 werden die Grundlagen der wichtigsten dargestellten Komponenten neben dem Brennstoffzellensystem beschrieben und ausführlich erläutert. Damit wird die Grundlage für die Modellierung und Spezifikation der Subsysteme gelegt, zu denen diese Komponenten gehören.

2.9 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden technische Grundlagen für die Entwicklung der Entwurfsmethodik und für die Auseinandersetzung mit dem elektrischen Antrieb und dem Brennstoffzellensystem beschrieben. Dabei lag besonderes Augenmerk auf den Grundlagen zur Systementwicklung und zu bekannten

Ansätzen der Spezifikation von Systemen. Auf der Basis der Grundlagenanalyse wurden einige Festlegungen getroffen, die für die weiteren Inhalte dieser Arbeit von Bedeutung sind.

- Die grundlegenden Schritte der Systementwicklung wurden erläutert und aufgezeigt, in welche Phasen sich diese Arbeit einordnet
- Die Vorteile modellbasierter Entwicklungsmethoden wurden beschrieben und skizziert, wie sich durch iterative Arbeitsweisen und reduzierte Dokumentationsaufwände, Entwicklungszeit und –kosten reduzieren lassen
- Ein Vergleich von Notationen zur Funktionsmodellierung lieferte die Beschreibungssprache SysML als geeignetes Werkzeug, mit dessen Hilfe die weiteren Modellierungsarbeiten durchgeführt werden
- Der Begriff der Funktionsarchitektur wurde für die spätere Verwendung definiert. Es wurde der Stand der Technik zur automatisierten Erstellung einer solchen Funktionsarchitektur dargestellt
- Die wissenschaftlichen Grundlagen der Brennstoffzellen und aller Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs wurden skizziert und in Anhängen ausführlich erläutert. Dabei wurden Randbedingungen für die weitere Spezifikation definiert, wie spezielle Anwendungsfälle der Fahrzeugnutzung und alle physikalischen Grundlagen für spätere Modellierungsschritte
- In zusätzlich hinterlegten Beispielrechnungen zum Spannungsniveau und zum Momentenbedarf in 13.1.3 wurden Festlegungen für die Betrachtung von elektrischen Topologien mit Spannungswandlern und mechanischen Antrieben mit fester Getriebeübersetzung getroffen.

3 Ansatz für verbesserte Methodik

Die vorangehende Beschreibung der wissenschaftlichen Grundlagen von elektrischen Antriebssystemen mit Brennstoffzellen verdeutlicht die Komplexität und den Entwicklungsumfang solcher Systeme. Deshalb haben Instrumente, welche durch eine verbesserte Systematik zur Reduktion des Entwicklungsaufwandes führen - und dadurch zur Verkürzung der Entwicklungszeiten - eine substantielle wirtschaftliche Bedeutung. Durch die Analyse bisher üblicher Entwicklungsansätze hat sich gezeigt, wo signifikante Herausforderungen im Entwicklungsprozess liegen. Unter Betrachtung dieser Herausforderungen bei der System-Produktentwicklung wird in dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, welche die frühen Phasen der Spezifikation und des Konzeptentwurfs verbessert. Eine Verbesserung wird dabei nach Kriterien bewertet, die auf eigenen Erfahrungen und den Ausführungen aus unter anderen [51], [52], [53], [20], [54], [55], [56] und [19] basieren. Diese sind:

- Verkürzung der Entwicklungszeit (Spezifikation und Konzeptentwurf)
- Reduktion des benötigten Dokumentationsumfangs
- Nachvollziehbarkeit von Anforderungen bis in den Entwurf (Traceability)
- Unterstützung iterativer Entwicklungsschritte in kurzen Zyklen
- Verkettung von Spezifikation und Konzeptentwurf zur Verbesserung des Entwicklungsflusses
- Frühe Einbindung von Analysemethoden wie FMEA (Fehlermöglichkeiten- und Einflussanalyse) und FKA (Funktionskostenanalyse)
- Management von Variabilität sowohl durch Verarbeitung von Varianten als auch durch robusten Komponentenentwurf zur Abdeckung von Spezifikationsstreuungen
- Gemeinsamer Entwurf von Hardware- und Softwareanteilen

Um die Kernmerkmale der Methodik zu definieren, mit der diese Verbesserungen erreicht werden sollen, wird die in Abbildung 23 skizzierte Struktur verwendet.

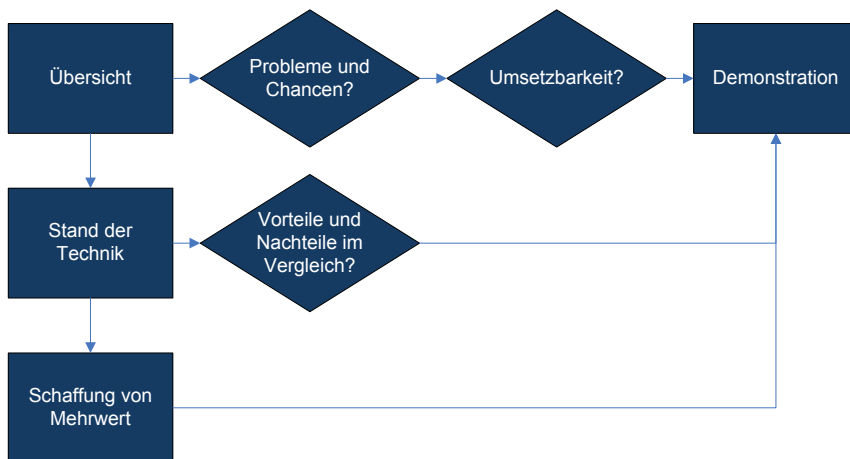


Abbildung 23: Ansatz zur Definition und Demonstration einer verbesserten Methodik

Die Elemente dieser Struktur sind Bausteine für den Entwurf eines Business-Plans nach [57]. Sie stellen eine vollständige Argumentationskette für den Nachweis einer Verbesserung dar. Diese Struktur lieferte daher einen Ablaufplan für die vorliegende Arbeit, wie in den folgenden Ausführungen skizziert.

Zunächst wird eine Übersicht über Probleme und Chancen geschaffen. Danach wird die Beschreibung des Standes der Technik genutzt, um Vor- und Nachteile der neuen Methodik zu beschreiben. Darauf basierend muss sich ein klarer Mehrwert ergeben, der eventuelle Zusatzaufwände rechtfertigt. Umsetzbarkeit und Mehrwert der Methodik können nur in einer Demonstration nachgewiesen werden. Daher widmet sich der Großteil dieser Arbeit der tatsächlichen Spezifikation und Auslegung eines elektrischen Antriebssystems unter Verwendung der hier entwickelten Entwurfsmethodik.

3.1 Übersicht des angestrebten Vorgehens

Basierend auf den zuvor beschriebenen, angestrebten Verbesserungen lassen sich einige Kernmerkmale der Zielmethodik definieren. Eine Entwicklungsmethodik mit diesen Merkmalen ermöglicht die verbesserte, systemorientierte Spezifikation elektrischer Antriebssysteme mit Brennstoffzellen. Als gewünschte Merkmale werden identifiziert:

- Eine strukturierte Systemableitung basierend auf Anwendungsfällen (Use-Cases) und Kundenanforderungen
- Die Verbindung von Anwendungsfällen (Use-Cases) und geforderten Fahrleistungen (Performance Benchmark) mit der Architekturdefinition des Systems
- Die Verbindung von Anwendungsfällen (Use-Cases) und Steuerungsabläufen
- Die sukzessive Eingrenzung und Spezifikation von Subsystemen in robustem, iterativem Vorgehen
- Konsistenz von Struktur, Systemverhalten und Anforderungen durch Ansätze der Produktentwicklung
- Vollständige Definition von Systemschnittstellen und Informationsflüssen zur Änderungsinflussanalyse (Impact Analyse)
- Definition plattformtauglicher Komponenten

Die genannten Merkmale lassen sich alle in einem modellbasierten Systementwurf realisieren. Dieser muss die Phasen der Anforderungsentwicklung (Requirements Engineering), der Vorauslegung auf Gesamtsystemebene und des Detailentwurfs auf Subsystemebene verbinden. Es ergibt sich eine Reihe von Betrachtungsrichtungen (Sichten), die in Abbildung 24 als Package-Diagramm dargestellt sind. Die einzelnen Sichten (SysML: <<view>>) gehören zu drei grundlegenden Blickwinkeln (SysML: <<viewpoint>>):

- den Anforderungen,
- dem Gesamtsystementwurf und
- dem Detailentwurf.

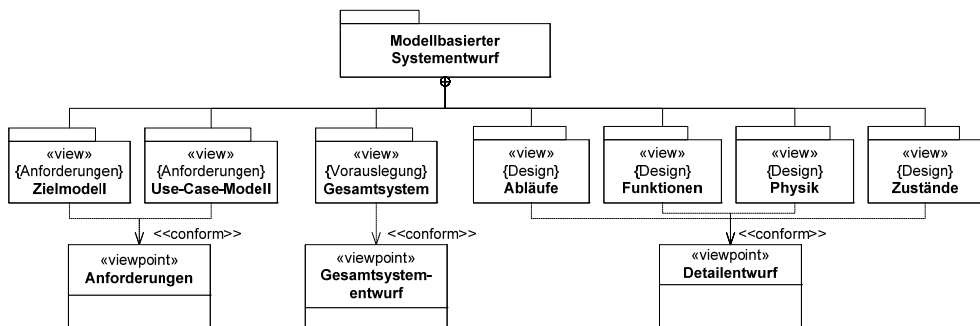


Abbildung 24: Sichten des modellbasierten Entwurfs zur Spezifikation und Konzeptentwicklung

Als Anforderungssichten werden eine Zielmodellierung und eine Use-Case-Modellierung definiert (siehe Kapitel 4). Im Gesamtsystementwurf werden Schritte der Vorauslegung durchgeführt, die nur auf Gesamtsystemebene realisierbar sind und die den Entwurfsraum sinnvoll einschränken (siehe Kapitel 5). Im Detailentwurf wird ein modellbasierter Entwurf in vier Sichten definiert. In einem konsistenten Entwurfskonzept aus Funktionen (siehe Kapitel 6), Physik (siehe Kapitel 7), Abläufen (siehe Kapitel 8) und Zuständen (siehe Kapitel 9) wird dann ein vollständiger Konzeptentwurf auf der Basis der vorher definierten Anforderungen und Vorauslegungen realisiert.

Die in Abbildung 24 dargestellte Struktur ist die Grundlage für alle nachfolgenden Schritte. Im Laufe dieser Arbeit wird jede dieser Sichten detailliert beschrieben und die jeweiligen Modelle für das Antriebssystem aufgebaut. Die Detaillierung von Abbildung 24 mit allen in den folgenden Kapiteln beschriebenen Inhalten ist in 16.1 enthalten. In Abbildung 24 ist bewusst kein Phasenablauf dargestellt. Ein prozessorientierter Ablauf von links nach rechts ist denkbar. Die einzelnen Sichten sind aber als Bausteine zu verstehen, die iterativ verbessert werden. Die Modellierung sollte so umfassend und genau wie nötig sein und dann beendet werden, wenn der Informationsbedarf gedeckt ist. Spezifikationsmodelle sollen Mittel zum Zweck sein und kein Entwicklungsziel.

3.2 Beseitigte Probleme und resultierende Verbesserungen

Durch die Verwendung des mit Abbildung 24 definierten Spezifikations- und Entwurfsansatzes können die beschriebenen Verbesserungspotentiale ausgeschöpft werden. Für den hier beschriebenen Anwendungsfall eines elektrischen Antriebssystems mit Brennstoffzellen ergeben sich durch die modellbasierte, systemorientierte Vorgehensweise die folgenden Verbesserungen:

- Die Anforderungsanalyse wird strukturiert und an der Kundennutzung des Produkts ausgerichtet
- Mechatronische Systemarchitekturen können mit Methoden der Produktentwicklung hergeleitet werden. Dabei können iterative Änderungen schnell realisiert werden
- Subsysteme können wirkungsvoll eingegrenzt und physikalisch definiert werden. Dadurch wird die Definition von Komponentenplattformen und die Parallelisierung von Entwicklungsumfängen ermöglicht
- Durch den Entwurf in vier Sichten werden Aspekte des Co-Designs von Mechatronik und eingebetteten Softwareanteilen berücksichtigt. Zustandsmaschinen und logische Abläufe können mit der physikalischen Realisierung abgeglichen werden
- Der Fluss des gesamten Entwicklungsablaufs wird systematisiert und gestrafft

3.3 Nachweis der Umsetzbarkeit

Um den Nachweis der Umsetzbarkeit zu führen, werden alle in Abbildung 24 dargestellten Modellierungssichten für das Anwendungsbeispiel des Brennstoffzellenantriebsstrangs aufgebaut. Die Struktur der Arbeit folgt dem in Abbildung 24 dargestellten Schema mit den folgenden Inhalten:

- Ableitung von Anforderungen und Strukturierung mit Anwendungsfällen
- Ableitung der funktionalen Architektur für eine Antriebsstrangplattform
- Definition von logischen Systemabläufen basierend auf Use-Cases
- Spezifikation physikalischer Subsysteme mit numerischen Werten
- Ableitung von Steuerungsanteilen in Form von Zustandsmaschinen und deren Einbindung in die Systemarchitektur
- Mapping von Systemabläufen auf Steuergeräte

Ergebnisse und der Nachweis der methodischen Verbesserung werden in jedem Kapitel dargestellt.

3.4 Mehrwert im Vergleich mit dem Stand der Technik

In einem Vergleich mit dem in 2.4.3 geschilderten Stand der Technik muss eine neue Spezifikations- und Entwurfsmethodik effektiver, effizienter oder einfacher in der Anwendung sein. Nur so lassen sich die angestrebten Verbesserungspotentiale erzielen.

- Effektivität lässt sich durch eine höhere Zahl identifizierter Funktionen, eine bessere Architekturdefinition oder eine genauere physikalische Auslegung erreichen
- Effizienz lässt sich durch eine Beschleunigung von Anforderungsanalyse, Funktionsanalyse oder physikalischem Entwurf erreichen
- Einfachheit in der Anwendung lässt sich über simple Notationen, übersichtliche Werkzeugketten und intuitives Verständnis der verwendeten Modelle und Methodenbausteine erreichen

In den folgenden Kapiteln werden die hier beschriebenen inhaltlichen und methodischen Verbesserungen am Anwendungsbeispiel des elektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzellen untersucht. Der durch die angestrebten Verbesserungen angestrebte Mehrwert wird nachgewiesen. Die Strukturierung der Arbeit entspricht den Sichten der Modellierung aus Abbildung 24 (Abläufe, Funktionen, Physik und Zustände). Diese werden zur Erläuterung aller Teilschritte sequentiell durchlaufen. Wie bereits beschrieben ist diese Abfolge jedoch nicht zwingend erforderlich, da hier kein Wasserfallprinzip, sondern eine iterative Entwicklungsmethodik verwendet wird. Den Einstieg in den Spezifikationsablauf bilden die Modellierungssichten des Anforderungs-Blickwinkels (linker Teil von Abbildung 24). Diese werden im folgenden Kapitel detailliert erläutert.

4 Anforderungsspezifikation

4.1 Einleitung

Der Aufbau der Anforderungsspezifikation zur Überführung von Nutzerbedürfnissen in technische Anforderungen, steht am Anfang jeder Entwicklungsmethodik, wie in Abbildung 25 dargestellt:

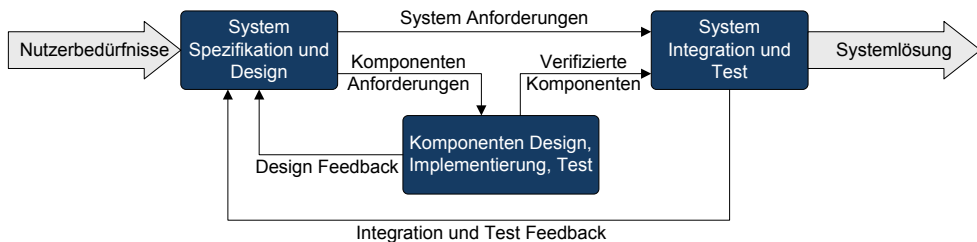


Abbildung 25: Vereinfachter Systementwicklungsablauf nach [58]

Der Umfang und die Art der Erhebung, Analyse und Dokumentation der Anforderungen weisen dagegen erhebliche Unterschiede auf. In diesem Kapitel wird die Art der Anforderungsspezifikation für den Anwendungsfall des elektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzellen definiert. Dazu wird zunächst eine Analyse der Aufwände und Nutzen der Spezifikationsphase („Requirements Engineering“) durchgeführt. Daraus werden konkrete Ziele für eine anwendungsspezifische Spezifikationsmethodik abgeleitet, die eine Balance aus Beschreibungstiefe und Informationsgehalt schafft. Es wird dargestellt, warum diese frühe Analysephase sinnvoll ist und welcher Mehrwert sich aus dem „Requirements Engineering“ ergibt.

Zur Analyse der Anforderungen werden ein Zielmodell und ein Use-Case-Modell aufgebaut wie in 2.5.3 dargestellt. Das Zielmodell liefert aus einer Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus den Ursprung aller funktionalen Anforderungen und Qualitätsziele. Das Use-Case-Modell erfasst Abläufe und Interaktionen der Verwendung des Fahrzeugs. Die Modelle sind so strukturiert, dass sich eine nahtlose Anbindung an die restlichen Schritte der modellbasierten Entwurfsmethodik ergibt. Auf Basis der erstellten Modelle wird ein Systemlastenheft strukturiert und aufgebaut.

4.2 Angepasstes Verfahren zur Anforderungsherleitung

In den Grundlagen der Systemspezifikation in 2.5 wurden die Vorteile einer sorgfältig durchgeführten Requirements-Engineering-Phase im Entwicklungsablauf erläutert. Die grundlegenden Phasen von der Anforderungserhebung bis hin zur Anforderungvalidierung wurden bereits beschrieben. Für jedes Verfahren zur Spezifikation von Anforderungen besteht immer ein Zielkonflikt zwischen dem notwendigen Aufwand und dem erwarteten Nutzen. Um diesen Zielkonflikt zu lösen müssen für jede Anwendung von Requirements Engineering der erwartete Nutzen und die nötigen Aufwände definiert werden. Auf dieser Basis können notwendige Dokumente, Modelle und Analyseschritte ausgewählt werden.

4.2.1 Aufwände der Anforderungsphase

Eine sorgfältig durchgeführte Anforderungsanalyse kostet Kapazität und Zykluszeit. Die Aufwand-/Nutzen-Betrachtung muss aber generell für den vollständigen Entwicklungsablauf durchgeführt werden. Außerdem ist die Anforderungsanalyse elementar für die Vermeidung späterer Änderungen, die in nachfolgenden Entwicklungsphasen höhere Änderungskosten verursachen, wie in Abbildung 26 dargestellt:

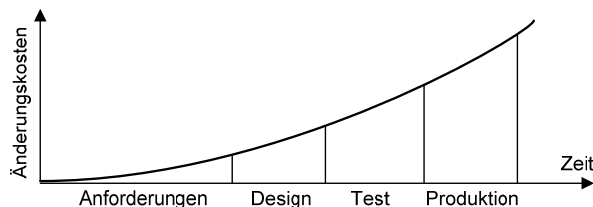


Abbildung 26: Änderungskosten im Laufe der Entwicklung [59]

Erhöhte Aufwände in frühen Entwicklungsphasen, das sogenannte „Frontloading“, sind jedoch nur dann sinnvoll, wenn die reduzierten Änderungsaufwände die Aufwände der Anforderungsphase rechtfertigen und wenn die investierte Zykluszeit durch spätere Zykluszeitgewinne (z.B. durch Parallelisierung) ausgeglichen beziehungsweise übertroffen wird. Die Aufwände der Anforderungsphase bestehen aus den Analyseaufwänden selbst und aus den Aufwänden der Übergabe an nachfolgende Entwicklungsschritte. Analyseaufwände setzen sich wiederum zusammen aus der Bearbeitungszeit des Analysen, Modellierungsaufwänden, Datenbankpflege, Interviews, Werkzeugkosten, Testaufwänden, etc. Abbildung 27 zeigt eine qualitative Gegenüberstellung der Aufwände und Nutzen. Dabei sind exponentielle Verläufe nach [53] angenommen. Entscheidend dabei ist die Annahme eines Grenznutzen, dem sich ein solcher exponentieller Verlauf annähert. Aufwände vor diesem Grenznutzen kann man als wertschöpfendes Frontloading bezeichnen. Alles darüber hinaus liefert keinen Zusatznutzen mehr. In diesem Fall können Entscheidungen verzögert werden, man spricht von „Analysis Paralysis“.

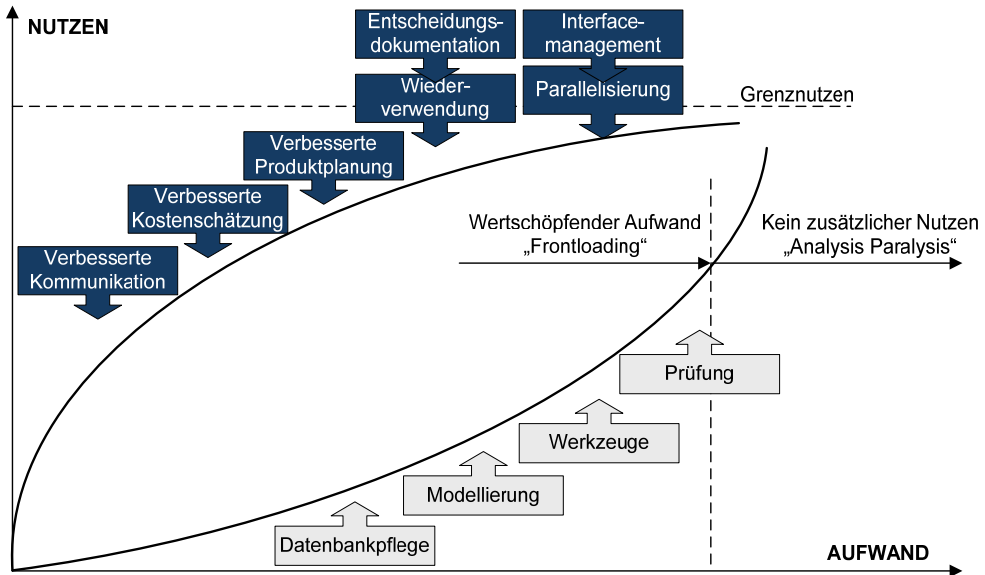


Abbildung 27: Gegenüberstellung der Aufwände und Nutzen der Anforderungsphase

Die Aufwände der Übergabe der Anforderungsprodukte (Modelle, Datenbanken, Informationen, Dokumente) an die Nutzer (z.B. in der Entwicklung) bestehen hauptsächlich aus Aufwendungen für Anforderungsdurchsprachen (Reviews) und Prüfungen. Diese Aufwände sind nach [53] ein klassisches Beispiel für einen Zielkonflikt mit lokalem Optimum, wie in Abbildung 28 dargestellt. Wie aus Abbildung 28 ersichtlich wird, ist das Aufwandsoptimum für die Requirements-Engineering-Phase eine Funktion aus „Transaktionsaufwänden“, und „Halteaufwänden“.

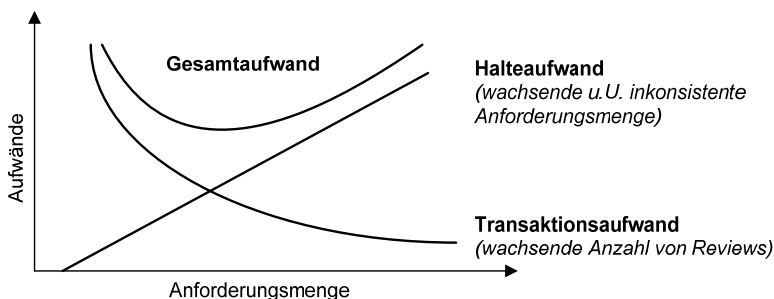


Abbildung 28: Aufwandsoptimum für die Requirements Engineering Phase [53] (Bei den Begriffen handelt es sich um eine Analogie zur industriellen Produktion: hohe Lagerbestände verursachen hohe Lagerkosten; die häufige Übergabe kleiner Mengen verursacht viele Handhabungsschritte)

Ein Aufwandsminimum lässt sich dann erreichen, wenn man eine häufige Übergabe (geringer Halteaufwand) kleiner Informationsmengen (geringer Transaktionsaufwand) durchführt. Das lokale Optimum zwischen den Kapazitätsaufwänden der Anforderungsphase und den Übergabeaufwänden an die Entwicklung (in Form von Prüfungen, Reviews, Datenaktualisierung, etc.) lässt sich demnach nur über eine iterative Bearbeitung erreichen. Beschreibungen klassischer Entwicklungsprozesse beinhalten jedoch immer eine vollständig abgeschlossene Requirements Engineering Phase [60], [61], [2], [8]. Dessen Arbeitsergebnisse, die Kundenanforderungen, werden vollständig und geprüft an die Entwurfsphasen übergeben, die auf der Basis der Kundenanforderungen eine technische Spezifikation erstellen. Diese Arbeitsweise orientiert sich an der Vorstellung des Wasserfallmodells [62], [63] und ist nicht geeignet um in einem Umfeld kurzer Entwicklungszeiten und häufiger Änderungen einen spürbaren Nutzen zu schaffen. Damit wird die Requirements Engineering Phase zu einem rein formalen Erfordernis, wird aber nicht inhaltlich genutzt. Der Austausch von Anforderungen wird sehr dokumentenlastig und die Kommunikationswege werden lang und träge [63]. Um dem entgegen zu treten beginnt die Entwurfsphase daher schon vor Abschluss der Spezifikation und es werden inoffizielle Kommunikationswege genutzt [53], [63]. Um diese Situation zu beheben, muss ein dynamischer Informationsaustausch zwischen Entwurf und Anforderungsphase stattfinden.

4.2.2 Ziele und Nutzen der Anforderungsphase

Um den in Abbildung 27 dargestellten potentiellen Nutzen der Anforderungsphase zu erschließen müssen geeignete Techniken ausgewählt werden. Nach [64] geht dies nur wenn das Ziel der Anforderungsphase explizit benannt ist. In [64] werden den Zielen der Anforderungsanalyse daher Erfordernissen an eine Spezifikationsmethodik zugeordnet. Die wichtigsten Erfordernisse nach [64] sind in der folgenden Auflistung um die in Abbildung 27 dargestellten Nutzen erweitert. Gemeinsam mit Kriterien aus der agilen Entwicklung nach [65] ergeben sich die folgenden Merkmale:

- **Unterstützung eines flüssigen Requirements Engineering Prozesses**
 - Unterstützung der Formulierung des Produktkonzepts
 - Systematischer schrittweiser Analyseablauf
 - Effektivitätsmessung der Anforderungsphase
 - Schrittweise Übergabe von Ergebnissen an Abnehmer (Spezifikationswerte werden mit gewonnenen Erfahrungswerten iterativ verschärft. Damit wird berücksichtigt, dass Markt- und Technikunsicherheit mit der Zeit abnehmen [53])
- **Unterstützung der Kommunikation**
 - Identifikation mehrerer Anforderungssichten
 - Innovation und Ideenbildung unterstützen
 - Parallelisierung von Subsystementwicklungen (dadurch Gewinn von Zykluszeit)
 - Effektiver Transfer der Nutzerwünsche in die Entwicklung
- **Unterstützung der Wissensgenerierung (der eigentliche Informationsgewinn)**
 - Übersicht über technologische Optionen
 - Formulierung von Vision und Entwurfsziel
 - Verbesserte Kostenschätzung
 - Priorisierung der Anforderungen und Möglichkeit der Neupriorisierung
 - Unterstützung früher Prototypenbildung
 - Sinnvolle Einschränkung des Entwurfsraums ohne die für Innovation und Ideengenerierung notwendige Variabilität zu unterdrücken.
- **Unterstützung der Dokumentation**
 - Identifikation von Randbedingungen
 - Identifikation von Akzeptanzkriterien für Tests
 - Identifikation aller Stakeholder und Ziele
 - Identifikation von Qualitätsattributen (Nicht-funktionale Anforderungen)
 - Aufstellung einer vollständigen und konsistenten Anforderungsdokumentation
 - Unterstützung bei der Dokumentation von Entwurfsentscheidungen
- **Unterstützung der Anforderungsverwaltung (Requirements Management)**
 - Verfolgbarkeit der Anforderungen vom Konzept bis in den Entwurf sichern
 - Interface-Management zwischen den Systemanteilen
 - Wiederverwendbarkeit von Anforderungsartefakten
 - Verwendbarkeit für Neuentwicklungen unter großer Unsicherheit

Die genannten Erfordernisse decken sich mit Beschreibungen in [66], [10] und [67] und bilden die Grundlage für die hier beschriebene Definition der Spezifikationsmethodik.

Nach der Identifikation der Ziele und Erfordernisse müssen Kriterien für die Messung des Erfolgs der Anforderungsphase definiert werden. In einer Studie aus [68] werden drei Erfolgsdimensionen mit entsprechenden Kriterien definiert. In der folgenden Auflistung sind Kriterien ausgewählt, die messbar sind und die Erreichung der oben genannten Ziele prüfbar machen:

- **Kosteneffektivität des Requirements Engineering**
 - Anzahl der Anforderungsartefakte, die nicht im Entwurf verwendet wurden
 - Anzahl der Änderungen an der Anforderungsdokumentation
 - Kostenanteil der Anforderungsphase an den gesamten Systementwicklungskosten
- **Qualität der Produkte der Anforderungsphase**
 - Klarheit der Verknüpfungen zwischen Modellen und den Entwicklungszielen
 - Informationsgehalt der Architekturmodelle
 - Nutzbare Testfälle
- **Qualität der Requirements Engineering Dienstleistung**
 - Klare Abgrenzung der Systemfähigkeiten
 - Reduzierte Änderungsaufwände
 - Akzeptanz der dargestellten Lösung bei den Anwendern
 - Aufbau einer Systemarchitektur unter Beachtung der Verwendung des Systems
 - Implementierbarkeit der empfohlenen Lösungen
 - Verständlichkeit und Konsensbildung
 - Wiederverwendbarkeit der Modelle und Spezifikationen

Die Wiederverwendung ist gerade bei einer Plattformentwicklung einer der zentralen Vorteile einer detaillierten, architekturzentrierten Requirements Engineering-Methodik. Die bisher beschriebenen Nutzen der Anforderungsphase gemeinsam mit entsprechenden messbaren Erfolgskriterien erlauben eine Auswahl geeigneter Werkzeuge, Methoden und Modelle für die Definition einer solchen Methodik.

4.2.3 Ableitung einer anwendungsspezifischen Spezifikationsmethodik

Für die in Abbildung 25 dargestellte Überführung der Nutzerbedürfnisse (Problemraum) in eine Systemspezifikation (Lösungsraum) existieren unterschiedliche Ansätze. In [69] werden zielorientierte Techniken mit szenario-basierten Techniken verglichen. Zielorientierte Techniken werden in [70] mit funktionalen Spezifikationen (direkte Spezifikation von Input, Output und Verhalten einzelner Systemfunktionen) verglichen. Eine weitere Technik zur Analyse und Beschreibung des Problemraums sind die Problem Frames, die in [71] beschrieben werden. Aufgrund der Notationskomplexität und dem Fokus auf Software Engineering wird diese Technik hier nicht näher betrachtet.

Gerade im Hinblick auf Neuentwicklungen oder Plattformentwicklungen, ist eine Zielorientierung in den Requirements-Engineering-Aktivitäten von Vorteil. Als Einstieg in die Spezifikation wird daher ein *Zielmodell* aufgebaut. Die Verwendung dieses Modells ist in 3.1 als Teil der Anforderungssicht dargestellt. Die Grundlagen der Zielmodellierung wurden in 2.5.2 beschrieben. Ziele sind dementsprechend Eigenschaften des Systems, die sowohl funktionale Aspekte beschreiben können, als auch Qualitätsattribute (nicht-funktionale Eigenschaften) [13]. Mit der Zerlegung der Ziele in einem hierarchischen Zielbaum lassen sich Verbindungen zwischen strategischen Zielen und technischen Anforderungen ziehen [13]. Die Vorteile der Zielorientierung werden unter anderem in [10], [13] und [17] beschrieben:

- Durch die Verwendung von Zielen kann die Vollständigkeit der Anforderungsspezifikation überprüft werden (Anforderungen sind dann vollständig, wenn alle Ziele erfüllt werden)
- Basierend auf den Zielen können testbare Kriterien der Zielerreichung definiert werden
- Die Priorisierung und Neupriorisierung kann bereits auf Zielebene erfolgen
- Ziele bieten eine geeignete Grundlage zur Diskussion und zur Identifikation von Anforderungen
- Die Zielzerlegung kann zur Strukturierung der Anforderungsdokumente verwendet werden
- Basierend auf Zielen können alternative Lösungsansätze bewertet und Konflikte beigelegt werden
- Widersprüche zwischen Zielen weisen auf Zielkonflikte der Systemdefinition hin

Die dargestellten Vorteile bilden im Hinblick auf die in 4.2.2 aufgelisteten Nutzen der Anforderungsphase einen geeigneten Einstieg in die Systemspezifikation. Eine eindeutige Modellierung und Strukturierung erzeugen die Grundlage für Kundenkommunikation, Verifikation, Systemlastenheft und Untersuchung von Zielkonflikten.

Die szenario-basierten Techniken werden oft mit zielorientierten Techniken kombiniert. Nach [10] dokumentieren Szenarien konkrete Beispiele für die geplante Systemverwendung. Dies ist die Grundlage für einen Entwurf, der laut [72] die Domäne der tatsächlichen Kundenverwendung mit dem Entwicklungsprozess verbindet. Daher ist das zweite in 3.1 dargestellte Modell der Anforderungssicht ein *Use-Case-Modell*. Die Grundlagen der Use-Case-Modellierung wurden bereits in 2.5.3 erläutert. Mit dem Use-Case-Modell können explizite Interaktionen zwischen Nutzer und Zielsystem gesammelt werden. Damit kann die in 4.2.2 geforderte Erfassung der geplanten Systemverwendung und der Definition von Testfällen berücksichtigt werden. Ein Szenario versteht sich in der hier beschriebenen Anwendung als Instanz eines Use-Cases. Jeder Use-Case verfügt über mehrere Szenarien. Vorteile der szenario-basierten Techniken werden unter anderen in [10], [73], [74] und [75] beschrieben:

- Einbindung von Wissen über den Verwendungskontext in den Entwurf. Anforderungen werden dadurch an einer konkreten Systemverwendung nachvollziehbar
- Strukturierung von Anforderungsdokumenten (Gliederung funktionaler Anforderungen nach [66])
- Unterstützung bei der Identifikation von Anforderungen und deren Kommunikation
- Kombination von Prototypen und Szenarien in szenario-basierten Tests (Szenario-Testing nach [75]). Solche Tests können direkt auf die Erfüllung der Kundenanwendung prüfen
- Funktionale Anforderungen und einschränkende Randbedingungen sind direkt auf Use-Cases zurückführbar. Damit können Anforderungen nutzungsbasiert priorisiert werden, indem die Use-Cases priorisiert werden (Z.B. nach Auftretenshäufigkeit, Relevanz, etc.)
- Auf der Basis von Use-Cases lässt sich ein Performance-Benchmark definieren, indem Performance-Kriterien für einzelne Use-Cases definiert werden. Damit lassen sich für das hier betrachtete Antriebssystem Fahrleistungen aus Nutzersicht für die einzelnen Use-Cases definieren, ohne Antriebstopologie oder technische Details zu kennen

Nach [10] konkretisieren Szenarien die vorher formulierten Ziele und die Zielerfüllung. Szenarien sind damit das Bindeglied zwischen den Stakeholdern und ihren Zielen und lösungsorientierten Anforderungen. Die hier verwendete Methodik zur Anforderungsherleitung kombiniert daher ein *Zielmodell* und ein *Use-Case-Modell*. Das Use-Case-Modell soll dazu auf geeignete Art und Weise in das Zielmodell integriert werden, um eine einzige Anforderungsquelle zu erzeugen. Diese Integration wird im folgenden Abschnitt am Anwendungsbeispiel des elektrischen Antriebssystems dargestellt.

4.3 Aufbau des Zielmodells

Das Zielmodell für den elektrischen Antriebsstrang mit Brennstoffzellen wird in einer Baumstruktur aufgebaut. In bekannten Realisierungen, z.B. in [13] werden Zielmodelle hierarchisch verfeinert und die Teilziele mit UND/ODER-Verknüpfungen logisch verbunden. Für die hier beschriebene Realisierung werden die Ziele nicht logisch verknüpft. Die hierarchische Verfeinerung ist damit eine reine UND-Zerlegung (alle Unterziele werden zur Erreichung des Oberziels gebraucht). Eine solche Struktur wird beispielsweise in [16] verwendet. Um die Produktvision und die Entwicklungsziele für den gesamten Produktlebenszyklus zu erfassen, wird der Zielbaum von links nach rechts anhand der Lebenszyklusphasen aufgebaut. Damit entsteht eine Struktur, wie in Abbildung 29 dargestellt:

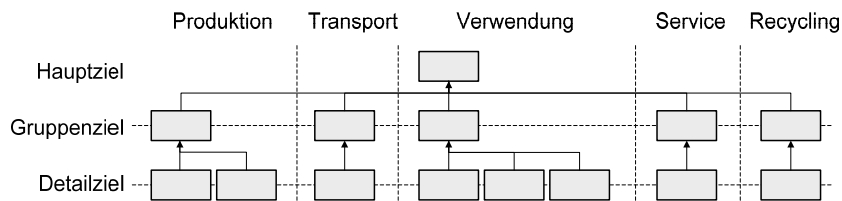


Abbildung 29: Struktur des Zielbaums in Lebenszyklusphasen und Verfeinerungsstufen

Unterhalb des Hauptziels („Elektrischer Antriebsstrang mit Brennstoffzellen“) sind Gruppenziele angeordnet, die für eine Kategorie stehen. Dies kann entweder eine funktionale Kategorie sein („Fahrzeug starten“) oder ein Qualitätsattribut („Verwendbarkeit“, „Service“, „Sicherheit“, etc.). Die Typunterscheidung in funktionale und nicht-funktionale Ziele wird von [13] noch erweitert. An dieser Stelle soll jedoch keine weitere Verfeinerung erfolgen. Der Zielbaum ist in der Blockdiagrammnotation der SysML aufgebaut. Dabei erfolgt eine reine Top-Down-Strukturierung. Die Ziele werden textuell beschrieben. Detailliertere Zieldefinitionen können laut [76] oder [13] über die Angabe von Zusatzparametern erfolgen. Die Zielzerlegung des Antriebssystems wird jedoch auf eine kurze Textbeschreibung beschränkt, wie das Beispiel in Abbildung 30 zeigt:

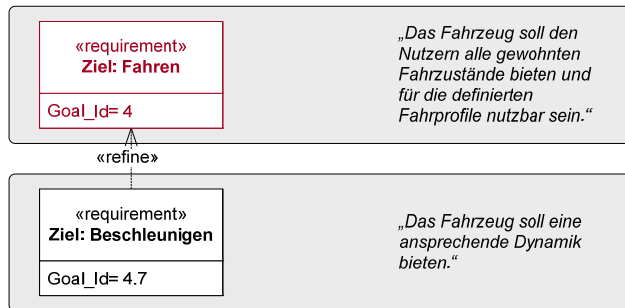


Abbildung 30: Beispiel für textuelle Zielbeschreibung im Zielbaum (Top-Down-Zerlegung)

Für die Ziele lässt sich jederzeit eine zusätzliche Priorisierung einfügen oder auch Akzeptanzkriterien für volle oder teilweise Zielerreichung definieren [17]. Die Orientierung am Produktlebenszyklus gemeinsam mit einer hierarchischen UND-Verfeinerung in Teilziele sorgt für eine hohe Abdeckung der zu generierenden Spezifikationsumfänge.

Um eine vollständige Anforderungszerlegung bis zu den Anforderungen und den Use-Cases zu erreichen, müssen Anforderungen und Use-Cases an den Zielbaum angeschlossen werden. Dies geschieht über den Zwischenschritt der Definition von Merkmalen (Features). Die Beschreibung von Systemen über Merkmale (Features) hat ihren Ursprung im Software-Engineering [77]. Eine Familie von Systemen wird dabei über Merkmale und deren Beziehungen untereinander beschrieben. Über die Auswahl der Merkmale lässt sich das System konfigurieren. Die zu den Merkmalen gehörenden Anforderungen beschreiben das System. Für die hier beschriebene Verwendung von Merkmalen gilt Def. 2:

Definition: Ein Merkmal beschreibt eine für den Nutzer wahrnehmbare Charakteristik des Systems. Dies kann eine funktionale Fähigkeit oder ein Qualitätsmerkmal sein.

Def. 2

Für die hier durchgeführte Zielzerlegung kann man eine Zuordnung technischer Merkmale einführen. Dazu wird unterhalb der Detailziele ein Merkmalsblock angeordnet, wie in Abbildung 31 dargestellt:

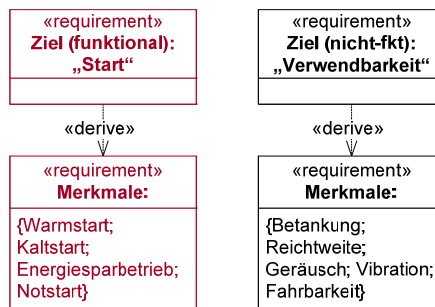


Abbildung 31: Zuordnung von Lösungsmerkmalen zu Zielen (Funktional (rot), nicht-funktional (schwarz))

In Abbildung 31 ist ein funktionales Ziel dargestellt, dem funktionale Merkmale zugeordnet werden. Die funktionalen Merkmale sind in der hier durchgeführten Zerlegung nichts anderes als die Use-

Cases. Damit dient das Zielmodell auch als Quelle des Use-Case-Modells und es entsteht eine einzige Top-Down-Zerlegung, die als Grundlage für das Lastenheft dienen kann. Die Orientierung der Use-Cases an Zielen wurde von [78] eingeführt. Die Kombination von Merkmalen und Zielen wird auch von [79] und [80] verwendet. Eine weitere Möglichkeit ist die von [81] beschriebene Anbindung von Szenarien an Ziele. Dabei werden Funktionen definiert, die das Ziel erfüllen und das Szenario ermöglichen. Diese Art der Zerlegung beschränkt sich jedoch auf funktionale Ziele und vernachlässigt die in 4.2.2 geforderte Berücksichtigung nicht-funktionaler Qualitätsattribute (Zuverlässigkeit, Verwendbarkeit, Sicherheit, etc.).

Durch die Integration der Merkmalsebene in den Zielbaum wird nicht nur die Anbindung der Use-Cases ermöglicht. Bei mehrfacher Zuordnung gleicher Merkmale lassen sich Zielkonflikte identifizieren, wie Abbildung 32 schematisch zeigt:

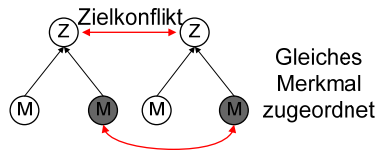


Abbildung 32: Aufdeckung von Zielkonflikten über Mehrfachverwendung von Merkmalen

Die so identifizierten Zielkonflikte können in der Vorauslegung untersucht und die resultierenden Entwurfsentscheidungen dokumentiert werden. Ein Beispiel ist das Merkmal der „leichten Bauweise“. Dieses Merkmal wird benötigt um das Ziel „guter Wirkungsgrad“ zu erreichen. Es kann aber auch dazu dienen das Ziel „dynamische Fahrweise“ zu erreichen. Diese beiden Ziele stehen unter Umständen zueinander im Widerspruch.

Den letzten Schritt der Anforderungsidentifikation bildet die Zuordnung von Anforderungsgruppen. Diese werden den Merkmalen direkt zugeordnet und bilden die letzte Ebene des Zielbaums. Es gilt Def. 3:

Definition: Eine Anforderungsgruppe vereint eine Menge funktionaler oder nicht-funktionaler Anforderungen. Ein Merkmal wird vollständig durch eine Menge von Anforderungsgruppen beschrieben.

Def. 3

Eine solche Zuordnung von Anforderungsgruppen ist in Abbildung 33 beispielhaft dargestellt. Damit ist ein vollständiger Baum aufgebaut, der sowohl in einer Anforderungsdatenbank als auch in einem Dokument zur Strukturierung der Anforderungen verwendet werden kann.

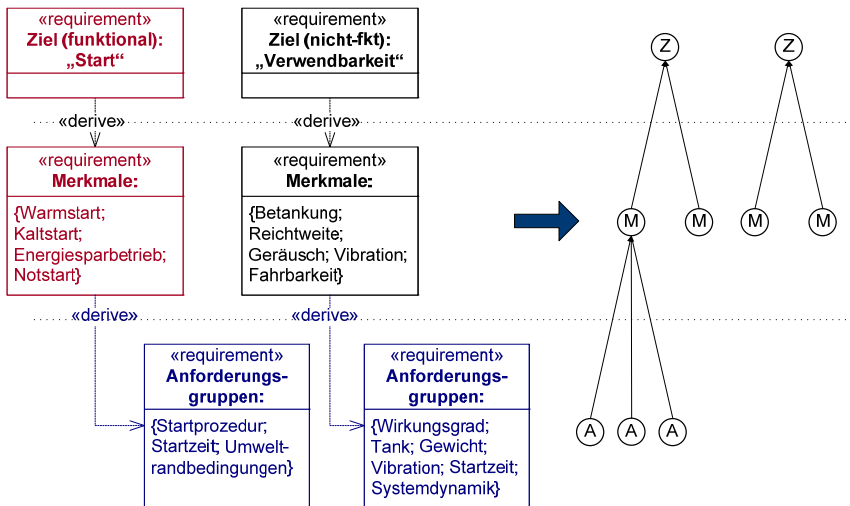


Abbildung 33: Baumstruktur aus Zielen (Z), Merkmalen (M) und Anforderungsgruppen (A)

Ein Beispiel für die in der Baumstruktur hinterlegten Inhalte zeigt Abbildung 34 anhand des Dynamikziels und eines Ausschnitts der hinterlegten Daten. Die dargestellten Anforderungsgruppen werden in weiteren Untersuchungen analysiert und spezifiziert.

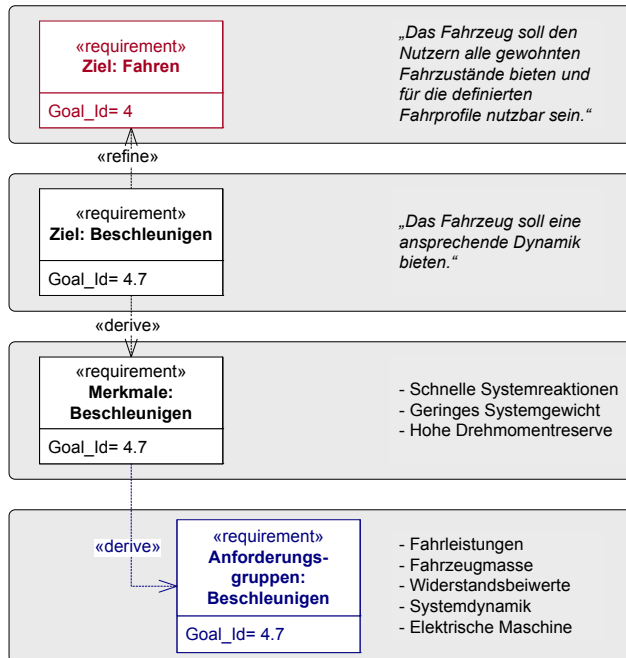


Abbildung 34: Beispiel für Zielbauminhalte (Dynamik als nicht-funktionale Eigenschaft definiert)

Für den Anwendungsfall des elektrischen Antriebsstrangs wurde auf der Grundlage der beschriebenen Modellierung eine vollständige Anforderungsspezifikation aufgebaut. Für das Zielmodell wurden die folgenden Elementzahlen identifiziert:

Gruppenziele	13
Funktionale Detailziele	7
Nicht-funktionale Detailziele	63
Funktionale Merkmale	35
Nicht-funktionale Merkmale	197
Anforderungsgruppen	195

Tabelle 4: Statistik der Zielbaumerstellung für den elektrischen Antriebsstrang

An der großen Elementzahl zeigt sich, dass in dem behandelten Anwendungsbeispiel eine Vielzahl von Zielkonflikten und eine hohe Anforderungsmenge bearbeitet werden muss. Mit dem Zielbaum als Analysewerkzeug und den Lebenszyklusphasen als Strukturierungsprinzip wird eine hohe Vollständigkeit der Anforderungen sichergestellt. Die Konsistenz der Anforderungen muss in weiteren Untersuchungen sichergestellt werden. In Abbildung 35 ist beispielhaft ein Ast des aufgebauten Zielbaums dargestellt. Die Daten sind in den Eigenschaften der Blöcke hinterlegt und können von dort exportiert werden. Eine vollständige Darstellung des Zielmodells ist aus Platzgründen nicht sinnvoll.

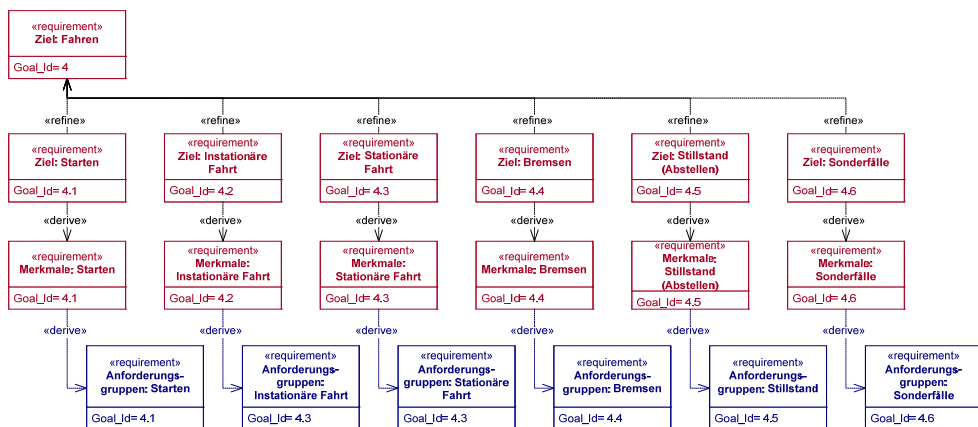


Abbildung 35: Ausschnitt aus dem Zielbaum des elektrischen Antriebssystems (funktionale Ziele)

Die Zerlegung des Zielbaums liefert für jede Anforderungsgruppe eine klare Quelle. Bei der Verwendung eines Datenbankwerkzeugs für die Dokumentation der Anforderungen können die Verbindungen des Zielbaums nachgebildet und zur Filterung verwendet werden. Für die in Abbildung 35 dargestellten funktionalen Ziele erfolgt die weitere Bearbeitung in der Modellierung der Use-Cases.

4.4 Aufbau des Use-Case-Modells

Mit Hilfe der Use-Cases wird in der hier beschriebenen Methodik die tatsächliche angestrebte Verwendung des Systems beschrieben. Damit wird die Grundlage für einen nutzerzentrierten Entwurf nach [72] gelegt. Ein Use-Case ist eine erste Beschreibung des Systemverhaltens. Eine solche Beschreibung ist in der Systementwicklung von zentraler Bedeutung. Use-Cases sind gemäß der Einführung in 2.5.3, Beschreibungen der Interaktionen zwischen Nutzer und System. Dabei werden zahlreiche Kontextinformationen erfasst und in einfacher graphischer und textueller Notation festgehalten. Motivationen zur Verwendung von Use-Case-Modellen im Entwicklungsablauf sind beispielsweise:

- Die Einbindung der Kundendomäne in Funktionsanalyse und Entwurf des Systems über die Erfassung von Systemabläufen und Kontextinformationen [82]
- Werkzeug zur Kommunikation und Diskussion über Systeminhalte und Systemverhalten [18]
- Unterstützung der Definition von nutzungsbasierten Testfällen [75]
- Verwendung von Use-Cases als funktionale Anforderungen [18] oder Verwendung von Use-Cases zur Identifikation und Strukturierung funktionaler Anforderungen [66]
- Grundlage für Priorisierung, Kostenbewertung, Teamaufstellung in der Systementwicklung [18]
- Use-Cases bündeln alle Szenarien der Systemverwendung und liefern damit die Grundlage für die Identifikation von Fehlerfällen und die Spezifikation von Fehlerreaktionen

Zur Festlegung der genauen Inhalte der Use-Cases gibt es eine Fülle verschiedener Definitionen [18], [73], [83], [84], [85]. Für die hier durchgeführte Analyse des elektrischen Antriebssystems werden die in 2.5.3 eingeführten Elemente definiert. Tabelle 5 zeigt ein Beispiel für die Wasserstoffbetankung:

Name	Tanken
Akteur	Fahrer; Tanksystem
Eventkette	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fahrer stellt Fahrzeug ab (Halten-Modus) 2. Fahrer öffnet Tankklappe 3. Fahrer schließt Tankschlauch an 4. Drucktank wird vom Betankungssystem befüllt 5. Tanksystem meldet Tankfüllstand 6. Fahrer entfernt Tankschlauch 7. Fahrer schließt Tankklappe

Vorbedingung	Fahrzeug im Stillstand (Halten-Modus)
Nachbedingung	Tank teilweise befüllt; Tankdruck eingeregelt; Tanktemperaturänderung

Tabelle 5: Use-Case-Formulierung am Beispiel der Wasserstoffbetankung

Für die Modellierung des Use-Case-Modells kann man hier einige Festlegungen treffen, die spezifisch für die Anwendung zur Beschreibung des elektrischen Antriebssystems sind. Der Zweck der Use-Cases ist hier die Identifikation funktionaler Anforderungen, die Identifikation des Systemkontextes und die Spezifikation des Systemverhaltens. Damit ergibt sich eine ähnliche Festlegung wie in [78]. Es gilt Def. 4:

- **Zweck:** Anforderungsidentifikation und Kontextmodellierung
- **Inhalt:** Konsistente Prosa
- **Pluralität:** Mehrere Szenarien in einem Use-Case zusammengefasst
- **Struktur:** Semi-formal

Def. 4

Zu Dokumentations- und Strukturierungszwecken wird die Gesamtheit der Use-Cases als SysML-Use-Case-Diagramm dargestellt. Dadurch werden Gruppen und Abhängigkeiten erkennbar. Insbesondere wird aber der Systemkontext mit den beteiligten Akteuren vollständig identifiziert, wie Abbildung 36 am Beispiel des physikalischen Systemkontextes zeigt. Die Akteure und die Systemgrenze sind das Ergebnis der Use-Case-Analyse.

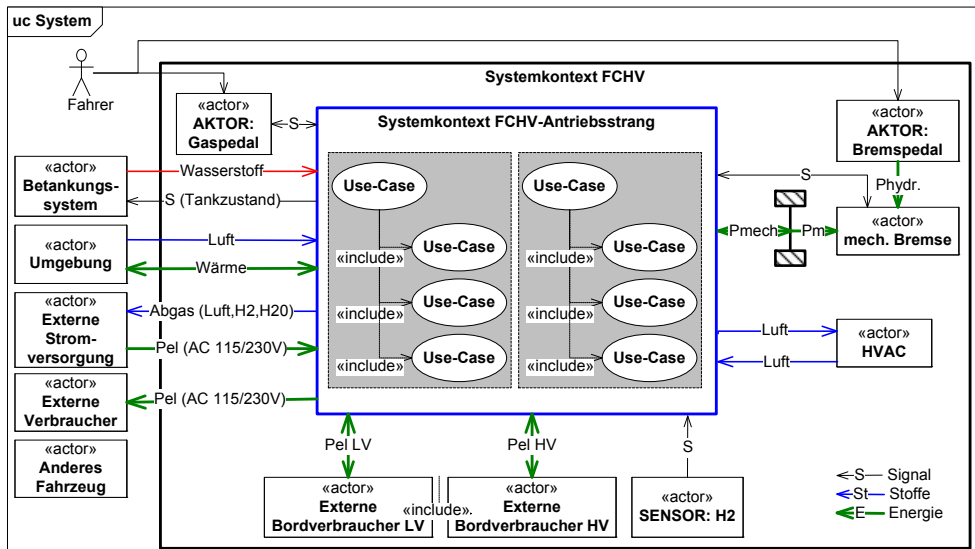


Abbildung 36: Identifizierter physikalischer Systemkontext aus der Use-Case-Analyse

Für die Strukturierung des Use-Case-Modells gibt es unterschiedliche Ansätze. [86] beschreibt ein hierarchisches Use-Case-Modell für die Systementwicklung softwarehaltiger Systeme. Dabei wird eine Ebene für das Gesamtsystem definiert. Danach werden für die physikalischen Subsysteme eigene Use-Cases definiert, auf deren Basis die eingebettete Software entwickelt werden kann. Die Grundlage dafür ist die Systemzerlegung und eine Anforderungszuweisung zu den Subsystemen. In [74] werden Use-Cases zu sogenannten Services gruppiert. Dadurch sollen funktionale Gruppen gebildet werden. In [87] werden sogenannte abstrakte Use-Cases verwendet. Diese stellen gemeinsame Grundelemente aller Use-Cases zur Verfügung. Die weiteren Use-Cases werden dann nur noch als Erweiterungen dargestellt („extends“-Beziehung in SysML). Dadurch werden Doppelnennungen einzelner Ablaufschritte vermieden.

Zur Strukturierung des Use-Case-Modells wird hier die spätere Definition von Zustandsautomaten berücksichtigt. Zu diesem Zweck werden die Use-Cases nach Betriebsarten gegliedert. Für eine identifizierte Betriebsart wird eine Use-Case-Beschreibung erstellt. Darunter werden die zugehörigen

Use-Cases hierarchisch untergeordnet und die inhaltlichen Elemente werden vererbt. Um die Lesbarkeit zu erhalten werden Use-Case-Inhalte für das Antriebssystem wiederholt. Szenarien werden als Instanzen der Use-Cases angeordnet. Damit entsteht eine Struktur, die in Abbildung 37 für das Beispiel des Tankens dargestellt ist. Der Use-Case „Tanken“ ist in der Darstellung der Betriebsart „Sonderbetrieb“ zugeordnet und mit einigen Szenarien detailliert.

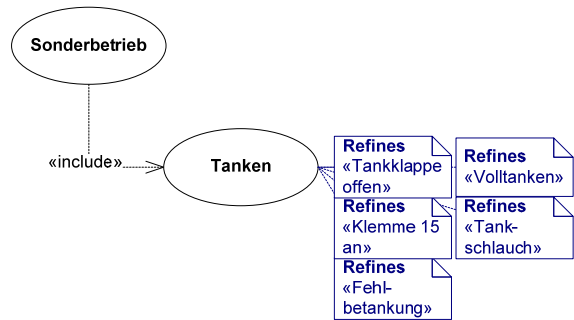


Abbildung 37: Strukturierung des Use-Case-Modells am Beispiel des Tankens

Mit der beschriebenen Strukturierung wurden für das hier behandelte Anwendungsbeispiel Use-Cases und Szenarien für die Betrachtungsebene „Gesamtfahrzeug“ erhoben. Die Use-Cases wurden anschließend zu Betriebsarten gruppiert. Dabei wurden die in Tabelle 6 dargestellten Elementzahlen identifiziert:

Betriebsarten	5
Use-Cases	34
Szenarien	96
Akteure	18

Tabelle 6: Statistik der Use-Case-Modellierung für die Gesamtfahrzeugebene

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Szenarien zusätzlich mit Randbedingungen wie Straßenzuständen oder Umweltbedingungen kombiniert werden können. Dadurch potenziert sich die Anzahl der zu berücksichtigenden Szenarien. Diese Kombination erfolgt daher nicht graphisch, sondern in Tabellenform. Das gesamte Use-Case-Modell ist in Abbildung 38 dargestellt. Die gleiche Abbildung findet sich zur Verdeutlichung in 16.2.

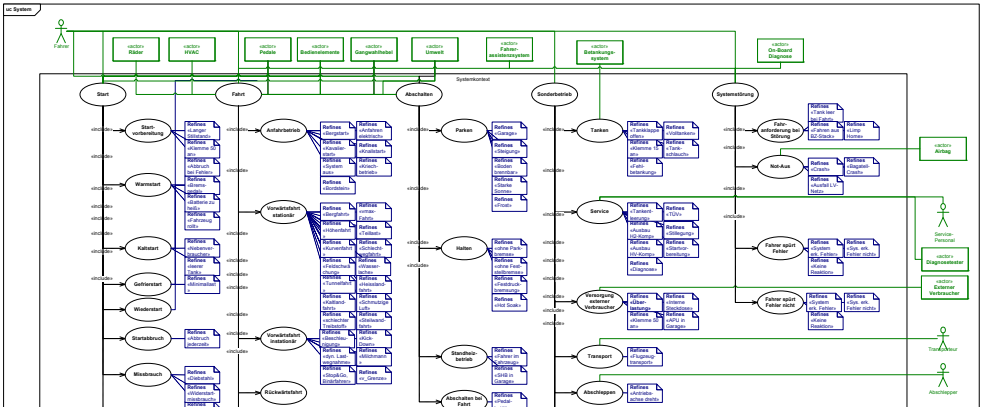


Abbildung 38: Use-Case-Modell für die Fahrzeugebene (siehe vergrößerte Darstellung 16.2)

Ein erwähnenswertes Detail ist die Definition relevanter Mensch-Maschine-Schnittstellen als Akteure. So werden beispielsweise die Pedalerie oder die Räder als Akteure definiert. Laut der Use-Cases sind sie dann Sender von Eingaben oder Empfänger von Services (z.B. die Räder als Abnehmer für bereitgestelltes Drehmoment). Auf Basis der Use-Cases können nun funktionale Anforderungen definiert

werden. Die Strukturierung im Lastenheft erfolgt gemäß der Use-Case-Struktur, die, wie schon die Struktur des Zielbaums, sowohl in eine Datenbank als auch in ein Anforderungsdokument übertragen werden kann. Wie auch beim Zielbaum stehen die Dateneinträge in den Eigenschaften der Blöcke. Eine entsprechende Funktionalität zum Export erlaubt die Weiterverarbeitung.

Für die Spezifikation des Systemverhaltens ist es notwendig, die in den Use-Cases definierten Systemabläufe in späteren Entwurfsphasen zu berücksichtigen. Dies ist eine direkte Vorbereitung der in 3.1 für den modellbasierten Entwurf definierten Ablaufsicht. Die Use-Cases sind die Quelle der später modellierten logischen Abläufe. Dadurch wird das geforderte Systemverhalten in den Entwurf überführt. Die genaue Modellierung wird an späterer Stelle beschrieben.

4.5 Anforderungsspezifikation im Systemlastenheft

Auf Basis der zwei Anforderungsmodelle wird die Struktur der Anforderungsdokumentation aufgebaut. Dabei wird die Zielzerlegung als Quellstruktur der Anforderungen übernommen. Qualitätsattribute (nicht-funktionale Anforderungen) werden entsprechend der Anforderungsgruppen strukturiert. Für die funktionalen Anforderungen erfolgt eine Strukturierung nach der Use-Case-Struktur, so wie in [66] beschrieben. Die Strukturierung berücksichtigt damit die Top-Down-Zerlegung und die Systembetrachtung, wie in Abbildung 39 dargestellt wird:

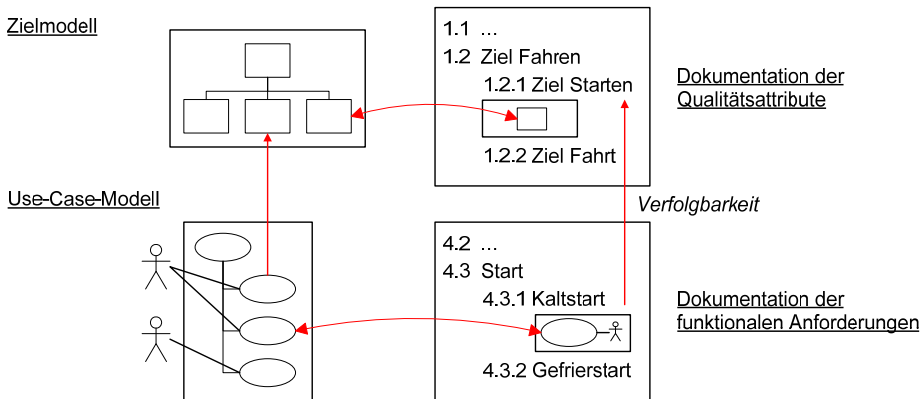


Abbildung 39: Struktur des Lastenhefts basierend auf der Modellierung (angelehnt an [66])

Um den Initialentwurf zu ermöglichen, muss als zusätzliches Element der bereits erwähnte Performance Benchmark definiert werden. Dadurch ist die Vorgabe eines generisch spezifizierten Kundenziels möglich, ohne Details der Systemlösung vorweg zu nehmen. Dieser Performance-Benchmark erfolgt durch die Vorgabe von Fahrleistungen. Beispiele für Fahrleistungsvorgaben zeigt Tabelle 7:

Beschleunigung 0 – 100 km/h	Das Fahrzeug mit Leergewicht darf maximal 12 Sekunden für die Beschleunigung von 0-100 km/h benötigen
Dauermaximalgeschwindigkeit	Das Fahrzeug mit Leergewicht soll eine Dauermaximalgeschwindigkeit von mindestens 165 km/h permanent halten können.
Bergsteigfähigkeit	Das Fahrzeug mit Leergewicht soll bei Konstantfahrt mit 30 km/h eine Steigung von mindestens 40 % dauerhaft durchfahren können.

Tabelle 7: Beispiele für Fahrleistungsvorgaben im Systemlastenheft

Gemeinsam mit Daten eines Referenzfahrzeugs ermöglichen diese Fahrleistungen eine erste Auslegung. Als Referenz werden in dieser Arbeit Daten des Fahrzeugs Mercedes-Benz F-Cell (B-Klasse T-245) [88] verwendet. Für das Lastenheft liegen damit die in Abbildung 40 dargestellten Elemente vor:

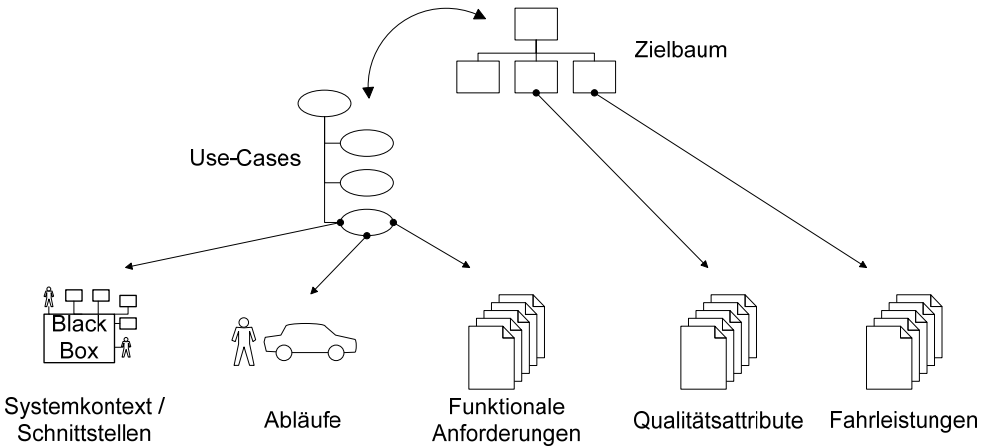


Abbildung 40: Ableitung der Elemente des Systemlastenhefts

Die Sammlung der Anforderungen orientiert sich an den hergeleiteten Anforderungsgruppen. Ohne Kundenspezifikation muss die Sammlung über Recherchen, Benchmarkdaten, Normen und andere Quellen erfolgen. Für das so erzeugte Lastenheft ergibt sich die in Tabelle 8 dargestellte Elementzahl:

Anforderungselemente	1431
In-Links	1536
Out-Links	1336

Tabelle 8: Statistik der Lastenhefterstellung für die Gesamtfahrzeugebene

Die Anzahl der Anforderungselemente ist für die Beschreibung des gesamten Antriebssystems nicht hoch. Dadurch kommt zum Ausdruck, dass für die Herleitung des Konzeptentwurfs nur so viel dokumentiert werden soll wie nötig. Die erfassten Anforderungen auf Produktebene haben eine hohe Granularität und sollen fortlaufend erweitert werden. Um das anvisierte Ziel der Zykluszeitverkürzung zu überprüfen, lässt sich das Wachstum der Datenbank graphisch darstellen. Abbildung 41 zeigt die Anzahl der Anforderungen und die Anzahl der akzeptierten Anforderungen nach deren Prüfung (Review):

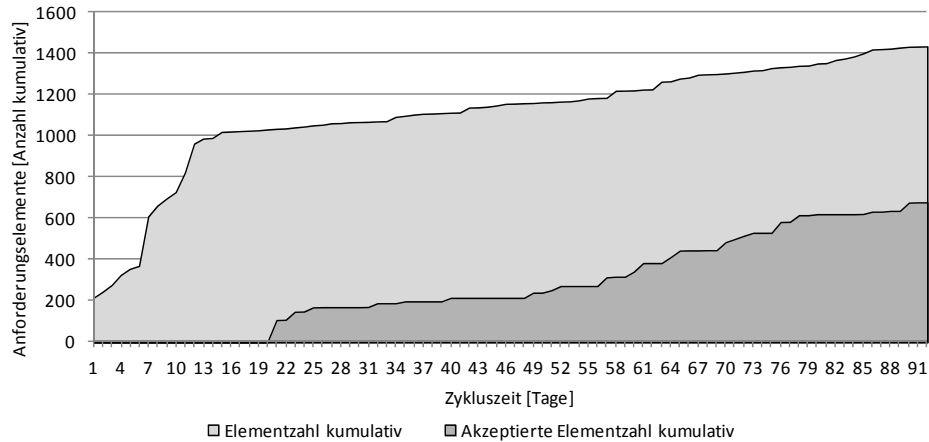


Abbildung 41: Entwicklung der Anforderungsdatenbank in einem Zeitraum von drei Monaten

Die beschriebene Modellierung und die dadurch identifizierten Anforderungsgruppen und Untersuchungsschwerpunkte erlauben ein schnelles initiales Wachstum. Die Anforderungsreviews werden kurz nach Beginn der Anforderungsdokumentation gestartet und in regelmäßigen, kurzen

Iterationen durchgeführt. Dadurch ist bereits nach dem kurzen betrachteten Zeitraum etwa die Hälfte der Elemente geprüft. Diese können dann direkt als Grundlage für die Auslegung verwendet werden. Alle Anforderungen sind dabei vollständig kundenbasiert und auf Use-Cases und Entwicklungsziele zurückführbar.

4.6 Zusammenfassung

Für die Entwicklungsphase der Anforderungsanalyse wurde in diesem Kapitel eine anwendungsspezifische Analyse- und Modellierungsmethodik definiert. Als Grundlage für die Methodik wurde eine Aufwand-Nutzen-Analyse für die Phase des „Requirements Engineering“ durchgeführt. Als Nutzen der Anforderungsanalyse wurden geringere Änderungskosten und reduzierte Zykluszeiten späterer Entwicklungsschritte identifiziert. Demgegenüber wurden die Kosten der Anforderungsanalyse mit Modellierungs- und Pflegeaufwänden, Zeitaufwänden und Werkzeugkosten beschrieben.

Aus Prozesssicht ergibt sich der Bedarf nach einer schrittweisen Freisetzung der Analyseergebnisse um Kapazitätskosten der Anforderungsphase und Übergabekosten an die Entwicklung auszubalancieren. Darin zeigt sich ein klarer Vorteil von Methoden, in denen iterative Arbeitsweisen vorgesehen sind und Daten und Ergebnisse in regelmäßigen Takten ausgetauscht werden.

Für die inhaltlichen Aspekte der Anforderungsanalyse wurde eine Kombination aus Zielmodellierung und Use-Case-Modellierung definiert. Die Modelle wurden vollständig aufgebaut. Die Zielmodellierung mit insgesamt 70 Zielen liefert 195 Anforderungsgruppen, die im Systemlastenheft erfasst werden. Das Use-Case-Modell mit insgesamt 34 Use-Cases liefert ein genaues Modell der Systemumgebung und eine Definition der Betriebsarten des Systems, auf dessen Basis das System in nachfolgenden Modellierungsschritten entworfen wird. Das Systemlastenheft wurde in funktionale Anforderungen, Qualitätsattribute und benötigte Fahrleistungen strukturiert. Für die verwendete Methodik der Anforderungssammlung wurde in einer Analyse der Datenbankerstellung ein schneller, iterativer Fortschritt nachgewiesen.

5 Vorauslegung auf Systemebene

5.1 Einleitung

Der Kern der in dieser Arbeit beschriebenen Entwurfsmethodik ist eine Betrachtung des Systems in vier Analysesichten. Als Ergebnis der zuvor durchgeführten Anforderungsanalyse kann eine Reihe von Designentscheidungen bereits früh getroffen werden. Dies ist sinnvoll, um den betrachteten Entwurfsraum zugunsten der Analysegeschwindigkeit geeignet einzuschränken. Es ist außerdem notwendig, um die Verbindung der Detailspezifikation auf Subsystemebene mit den Kundenanforderungen herzustellen. Zur Identifikation dieser richtungsweisenden Designentscheidungen und zur Quantifizierung von deren Auswirkungen dient ein Vorauslegungsschritt auf Systemebene. Dabei erfolgt eine erste Übersetzung der in der Anforderungsanalyse gesammelten Anforderungen in Elemente des Entwurfs, ohne den Detailentwurf einzelner Teilsysteme vorweg zu nehmen.

In den folgenden Analysen wird für das zugrunde liegende Anwendungsbeispiel zur Veranschaulichung beispielhaft die Betriebsart „*Fahren*“ betrachtet und zentrale Auslegungsmerkmale identifiziert, die in der Gesamtsystemsicht beschrieben werden müssen. Diese sind die Leistungsauslegung und die Hybridisierung des Systems. Beide Größen werden über eine Längsdynamiksimulation berechnet. Eine zusätzliche Kostenbewertung schließt die Betrachtung ab.

5.2 Definition der wichtigsten Auslegungsmerkmale

Die Basis für die Vorauslegung sind für die in dieser Arbeit entwickelte Methodik, die in der Use-Case-Analyse identifizierten Betriebsarten. Die Zerlegung in Betriebsarten liefert einen System-schnitt, der eine Bearbeitung des Gesamtsystems erlaubt, ohne Details der Subsystemstruktur zu kennen. Der Arbeitsablauf entspricht Abbildung 42:

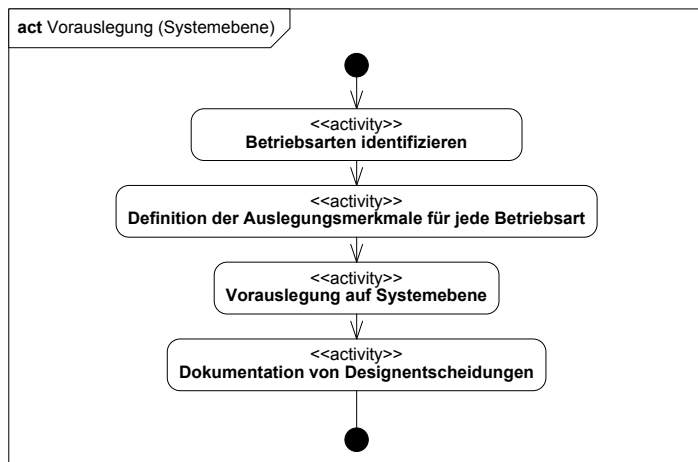


Abbildung 42: Arbeitsfluss der Teilmethodik für die Verhaltenssicht

Die Definition zentraler Auslegungsmerkmale ist vergleichbar mit Ansätzen aus dem „*Axiomatic Design*“ [89], [90]. Bei diesem Ansatz zum Systementwurf wird eine systematische Transformation funktionaler Anforderungen in Designparameter angestrebt. Die Entscheidung, welche Auslegungsmerkmale relevant sind, muss jedoch auf Systemebene getroffen werden. Im Falle der hier angewandten Systementwicklungsmethodik soll ebenfalls diese erste Transformation erfolgen. Daher wird basierend auf dem im Use-Case-Modell identifizierten Systemkontext ein physikalischer Kontext für jede Betriebsart modelliert. Es werden also die für eine bestimmte Betriebsart relevanten Schnittstellen und damit die an den Schnittstellen wirkenden physikalischen Flüsse in einem gesonderten Modell dargestellt. Den physikalischen Flüssen lassen sich Anforderungen zuordnen, wie in Abbildung 43 schematisch dargestellt:

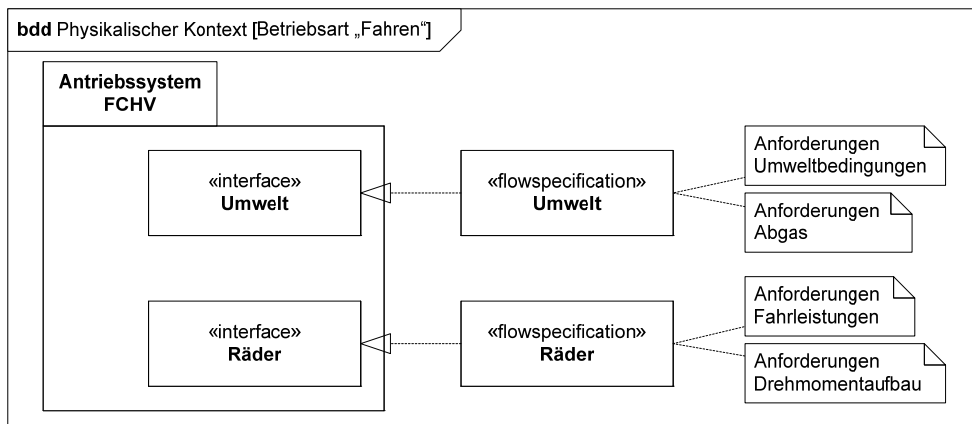


Abbildung 43: Physikalischer Kontext für eine Betriebsart (Anforderungen an Schnittstellen zugeordnet)

Die Anforderungen, die zugeordnet werden können, sind hauptsächlich die Fahrleistungen aus dem Systemlastenheft oder Performance-Anforderungen. Eine Darstellung des physikalischen Kontextes mit zugeordneten Anforderungen für die Betriebsart „Fahren“ ist in 16.3 enthalten.

Für die Bestimmung der wichtigsten Auslegungsmerkmale kann man den Schnittstellen gewünschte Wirkungen zuordnen. Hiermit wird bereits der Grundstein für die später erfolgende Funktionsanalyse gelegt. Beschreibt man diese Aufgaben durch technische Parameter (z.B. „Antriebsleistung“, „Stapeltyp“, „Tankdruck“) lassen sich Gruppierungen erkennen und Schwerpunkte setzen. Folgende Schwerpunkte wurden für die Vorauslegung definiert:

- Elektrische Leistung / Mechanische Leistung / Hybridisierung
- Tankkonzept
- Luftversorgung und Abgasabfuhr
- Thermische Konditionierung
- Startfähigkeit / Abschaltfähigkeit
- Ladegerät / Power-Panel-Leistung (Optionale Zusatzvarianten)
- Diagnosefähigkeit

Zu diesen Auslegungsschwerpunkten lassen sich basierend auf den Anforderungen erste Aussagen treffen. Dabei ist die Erfahrung der Entwickler die Quelle für die korrekte Zuordnung von Anforderungen und für die korrekte Auswahl der notwendigen Analyseschritte. Auch bei teilautomatisierten Entwurfsunterstützungen wie in [91] beschrieben, müssen frühe Entwurfsentscheidungen getroffen werden. Die hier entwickelte Methodik strebt eine vollständige Aufdeckung der notwendigen Entwurfsentscheidungen und deren Dokumentation an. Dies lässt sich beispielsweise direkt mit der Anforderungsdatenbank koppeln.

Die Vorauslegung kann keinen Vorentwurf für einzelne Subsysteme liefern. Die Subsystemstruktur ist zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt, weshalb in den Grenzen der abstrakten Strukturierung der Betriebsarten gearbeitet wird. In den folgenden Abschnitten wird beispielhaft die Analyse der Betriebsart „Fahren“ und die Analyse der relevanten Fahrleistungsanforderungen dargestellt.

5.3 Vorauslegung für die Betriebsart „Fahren“

Die Betriebsart „Fahren“ enthält die zentrale Schnittstelle des Systems, den Momentenabtrieb zur Straße über die Räder. Dieser Schnittstelle können sämtliche Fahrleistungsanforderungen zugeordnet werden, die sich direkt auf das benötigte Drehmoment und die benötigte elektrische Leistung beziehen. Die Auslegungsschwerpunkte für diese Betriebsart (Mechanische Bedarfsleistung/Elektrische Bedarfsleistung/Hybridisierung) wirken direkt auf diese Schnittstelle. Die Hybridisierung des Systems ist eine direkte Folge der in der Anforderungsspezifikation geforderten Rekuperationsfähigkeit. Sie ist eine zentrale Vordimensionierung für den weiteren Systementwurf des Brennstoffzellensystems. An dieser Stelle zeigt sich deutlich, dass der Systementwurf kein linearer

Vorgang ist. Die Top-Down-Analyse wird mit Vorüberlegungen gepaart, die wichtige Entwurfsfestlegungen bewirken. Diese Abläufe lassen sich nur eingeschränkt systematisieren, zeigen aber deutlich, an welcher Stelle Iterationen, Designentscheidungen oder Erweiterungen der Anforderungen notwendig sind.

5.3.1 Analyse des Leistungsbedarfs

Der Leistungsbedarf für das Antriebssystem wird über eine Simulation der Längsdynamik berechnet. Dabei gelten die Fahrwiderstände nach [92] (Der Massenfaktor dient der Berücksichtigung der Massenträgheitsmomente der rotierenden Massen innerhalb des Antriebsstrangs):

$$\text{Fahrwiderstände} \quad F_W = \frac{\rho_L}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v^2 + m \cdot g \cdot f_R + (e_i m_{Fzg} + m_{Zu}) \cdot a_x \quad \text{Gl. 4}$$

ρ_L : Luftdichte	c_w : Widerstandsbeiwert	A : Querschnittsfläche
v : Geschwindigkeit	e_i : Massenfaktor	m : Gesamtmasse
a_x : Beschleunigung	m_{Fzg} : Fahrzeugmasse	m_{Zu} : Masse Zuladung
f_R : Rollreibungsbeiwert	g : Erdbeschleunigung	

In einer statischen Berechnung für konstante Geschwindigkeiten in der Ebene und das in der Anforderungsanalyse definierte Referenzfahrzeug ergibt sich die in Abbildung 44 dargestellte Bedarfsleistung:

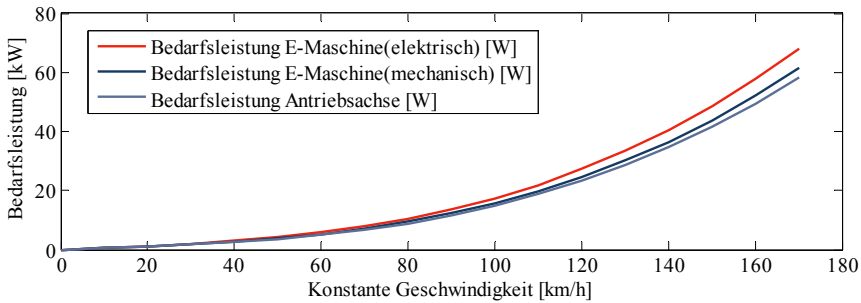


Abbildung 44: Bedarfsleistung für stationäre Fahrt (Feste Getriebeübersetzung, keine Steigung)

Eine höhere Bedarfsleistung ergibt sich bei der Betrachtung dynamischer Fahrzustände. In der Anforderungsanalyse ist eine Reihe dieser Fälle definiert. Mit einem einfachen Längsdynamikmodell nach [93] lassen sich diese dynamischen Szenarien oder vollständige Fahrzyklen simulieren. Für die hier beschriebene Untersuchung wurden alle Lastfälle und eine Reihe von Fahrzyklen simuliert. Der Vergleichsmaßstab ist immer die elektrische Bedarfsleistung nach Gl. 4:

$$\text{Elektrische Bedarfsleistung} \quad P_{el} = M_{EM} \cdot \omega_{EM} = \frac{M_R \cdot \omega_R}{\eta_{EM}} = \frac{F_W \cdot r_{dyn} \cdot \omega_R}{\eta_{EM}} \quad \text{Gl. 5}$$

Mit:	F_W : Fahrwiderstände	ω_R : Drehgeschwindigkeit ω_{EM} : Rad/E-Maschine	r_{dyn} : Dynamischer Radradius
	M_R : Drehmoment M_{EM} : Rad/E-Maschine	η_{EM} : Wirkungsgrad Maschine	

Für alle simulierten dynamischen Lastfälle wird die maximal auftretende elektrische Leistung gespeichert. Sie gilt damit als maximale Anforderung für den Lastfall und wird für jedes Szenario gespeichert. Die höchste Leistungsanforderung mit 89 kW entsteht dabei für den Lastsprung von 10 % auf 90 % der Maximalleistung. Dieser Fall ist in Abbildung 45 dargestellt:

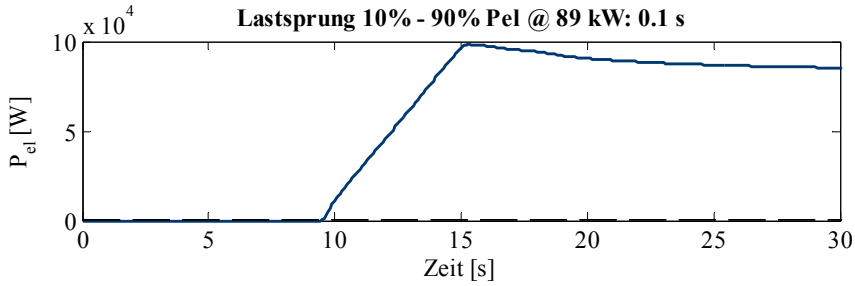


Abbildung 45: Leistungsbedarf für Lastsprung von 10 % auf 90 % der Maximalleistung des Antriebs

Für die Simulation gesamter Fahrzyklen wurden ebenfalls Fahrwiderstände und resultierender Leistungsbedarf aufgezeichnet. Diese Auslegung ist für die Bestimmung der Batteriedaten in 5.3.2 notwendig. Ein Beispiel für die Ergebnisse der Längsdynamikberechnung zeigt Abbildung 46 für den NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus). Dieser Zyklus stellt keine hohen Leistungsanforderungen, ist hier aber zu Vergleichszwecken dargestellt:

Zyklus: NEDC | Energiebedarf: 1.9 kWh (17.2 kWh/100 km)

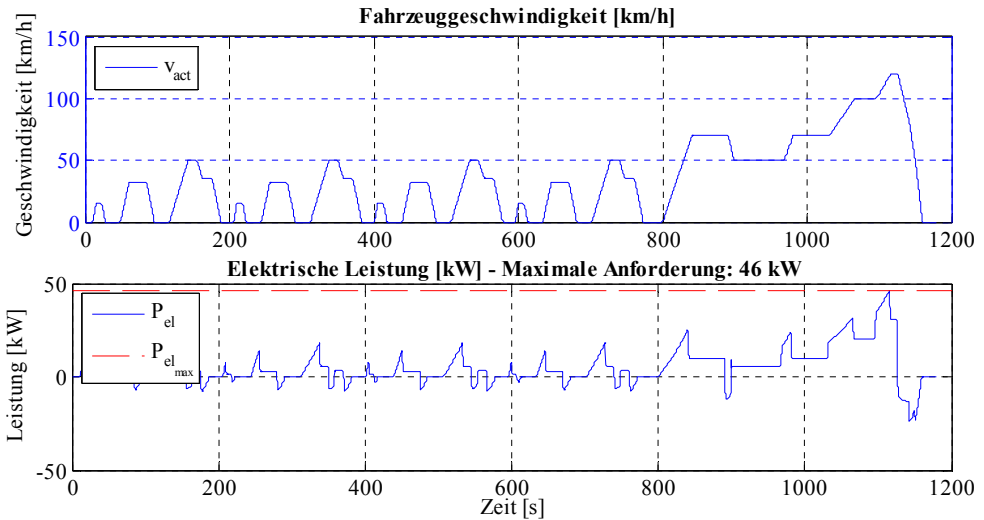


Abbildung 46: Ergebnis der Längsdynamiksimulation für den NEFZ-Zyklus (Geschwindigkeit und Leistung)

Abbildung 46 zeigt neben der Aufzeichnung von Geschwindigkeitsverlauf, elektrischer Bedarfsleistung und den berechneten Fahrwiderständen auch die Grenzbedingungen, die für den Zyklus auftreten. Für den dargestellten NEFZ ergeben sich demnach eine elektrische Maximalleistung von 46 kW und ein Maximaldrehmoment der Traktionsmaschine von 72,8 Nm. Der elektrische Energiebedarf für die Zyklusdurchfahrt ergibt sich aus Gl. 6:

$$\text{Energiebedarf Zyklus} \quad E_{el,Zyklus} = \int_0^T P_{el} dt \quad \text{Gl. 6}$$

Damit ergibt sich für den betrachteten Zyklus NEFZ ein elektrischer Energiebedarf von 1,9 kWh. Aufgrund der Ergebnisse der statischen und dynamischen Simulation werden für alle weiteren Detailauslegungen im betrachteten Anwendungsbeispiel Gesamtsystemleistungen von 90 kW und 100 kW festgelegt. Damit können alle relevanten Lastszenarien abgedeckt werden. Der Drehmomentbedarf ergibt sich direkt aus der Umrechnung der Fahrwiderstände, wie in Abbildung 47 dargestellt über die Annahme einer konstanten Getriebeübersetzung mit $i = 8$:

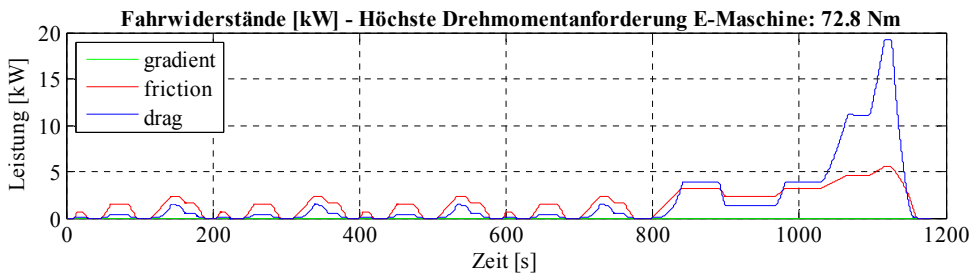


Abbildung 47: Ergebnis der Längsdynamiksimulation für den NEFZ-Zyklus (Fahrwiderstände)

Für die dynamischen Simulationen ergibt sich ein Maximalmoment von 155 Nm. Die Steigungs-szenarien liefern ein Maximalmoment von 228 Nm (40 % Steigung bei 30 km/h). Basierend auf diesen Drehmomentbedarfen kann eine theoretische Kennlinie für die elektrische Maschine definiert werden, die als Grundlage für weitere Berechnungen dient. Die in Abbildung 48 gezeigte Kennlinie kann als Startpunkt einer iterativen Auslegung betrachtet werden:

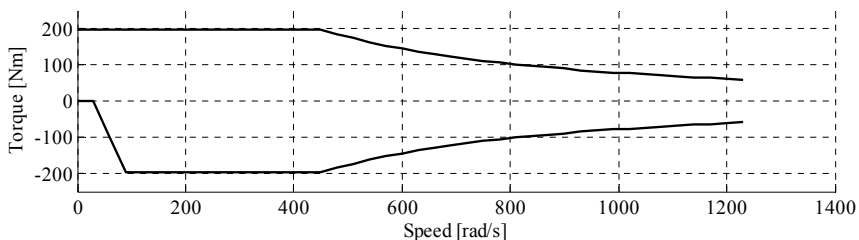


Abbildung 48: Theoretische Maschinenkennlinie basierend auf der Längsdynamikberechnung

Einer der Auslegungsschwerpunkte für die Betriebsart „Fahren“ ist damit vollständig bestimmt. Wie bereits beschrieben ist die Aufteilung der Gesamtsystemleistung auf beide Energiewandler, also der Hybridisierungsgrad des Systems, eine weitere zentrale Festlegung für den weiteren Konzeptentwurf und die Spezifikation. Daher wird dieser Designschritt im Folgenden detailliert beschrieben.

5.3.2 Analyse des Hybridisierungsgrads

Der Hybridisierungsgrad des Brennstoffzellensystems ist hier nach Gl. 7 definiert:

$$\text{Hybridisierungsgrad} \quad x_{\text{hybrid}} = \frac{P_{\text{Bat}}}{P_{\text{ges}}} \quad \text{Gl. 7}$$

Mit: P_{Bat} : Batterieleistung P_{ges} : Gesamtleistung

Damit beschreibt ein Hybridisierungsgrad von 100 % ein reines Batteriefahrzeug. Ein Hybridisierungsgrad von 0 % steht für ein reines Brennstoffzellenfahrzeug. Für ein hybridisiertes Brennstoffzellensystem gibt es die unterschiedlichsten Varianten, wie beispielsweise in [94] beschrieben. Die Dimensionierung des Energiespeichers erfolgt dabei generell sowohl nach Leistung als auch nach Energieinhalt. In [95] wird das Verhältnis von Leistung und Energieinhalt als Kennzahl verwendet.

Der Energieinhalt der Batterie wird grundsätzlich nach den in 13.1.1 beschriebenen Zusammenhängen bestimmt. Nach [95] gilt:

$$\text{Energieinhalt Batterie} \quad E_{\text{Bat}}(t) = E_{\text{Bat}}(t_0) + \int_0^{t_z} P_{\text{Bat}}(t) dt \quad \text{Gl. 8}$$

Mit: P_{Bat} : Batterieleistung t_z : Zyklusdauer t_0 : Startzeitpunkt

Wie stark die Batterie beim Zyklusdurchlauf belastet wird, ist direkt abhängig von der Betriebsstrategie. Für den Einsatz der Batterie existieren stark unterschiedliche Kriterien. Auf Basis einer Festlegung des Batterieeinsatzes und den Randbedingungen aus der dynamischen Simulation lassen sich die Batterieanforderungen bestimmen. Für das hier betrachtete Anwendungsbeispiel kommen nur kurzfristige Einsätze in Betracht. Die Batterie dient demnach beispielsweise der:

- Unterstützung von dynamischen Fahrsituationen
- Energieversorgung beim Start
- Rekuperation von Bremsenergie

Anforderungen an den Energieinhalt der Traktionsbatterie in Abhängigkeit dieser und anderer Fahrsituationen beschreibt [90]. Die höchste Anforderung ergibt sich für das regenerative Bremsen mit 1,5 kWh Nennkapazität. Die Hybridisierung auf Basis des Wasserstoffverbrauchs und damit auf Basis des Wirkungsgrads untersucht [96]. Eine ähnliche Analyse wird hier durchgeführt um das optimale Verhältnis aus Batterie- und Brennstoffzellenleistung zu identifizieren.

Mit einem Gesamtsystemmodell lässt sich überprüfen, in welcher Größenordnung der Hybridisierungsgrad für einen geringen Wasserstoffverbrauch eingestellt werden muss. Dabei wird das Modell aus [93] und eine Bordnetzvariante nach Abbildung 49 verwendet.

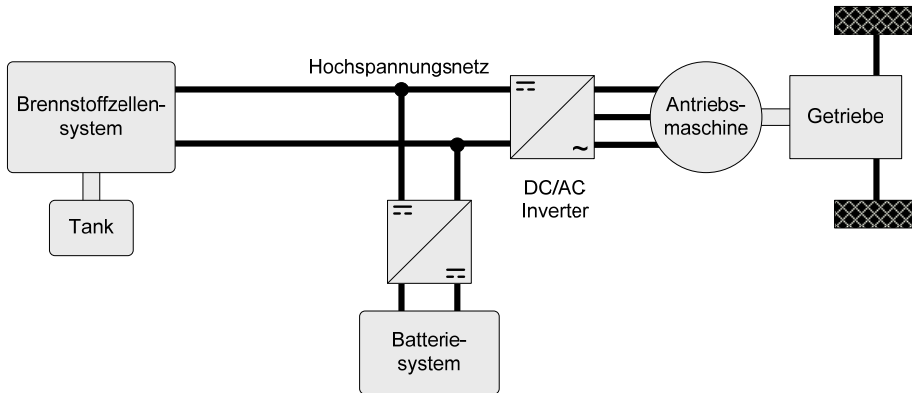


Abbildung 49: Bordnetz mit einem Wandler vor der Batterie (vergleichbar mit [96])

Man kann argumentieren, dass derartige Modelle an dieser Stelle des Entwicklungsprozesses noch nicht vorhanden sein können. Es zeigt sich jedoch, dass im Zuge einiger Iterationen auch einfachere Betrachtungen zum gleichen Ergebnis führen. Um eine sequentielle Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen wird das Ergebnis dieser Iterationen hier vorweg genommen. Für die Verbrauchssimulationen wurden verschiedene Fahrzyklen zugrunde gelegt. Um die Effekte verschiedener Batterieladestände auf den Zyklusverbrauch auszugleichen, muss eine Ladezustandskorrektur vorgenommen werden. Dazu wird nach [93] ein Zyklus mehrfach mit unterschiedlichen Batterieladeständen durchfahren. Für jeden Durchlauf werden die Änderung des Ladestands und der dazugehörige Verbrauch aufgezeichnet. Die dabei entstehende Korrelationsgerade liefert beim Nulldurchgang ($\Delta SOC = 0$) den ladestandskorrigierten Verbrauch. Für verschiedene Hybridisierungsgrade ergeben sich damit die in Abbildung 50 dargestellten Verbräuche:

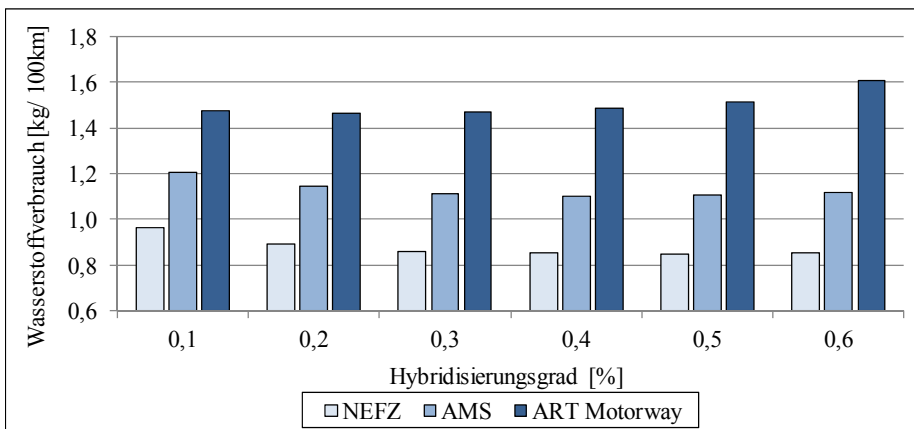


Abbildung 50: Verbrauch (ladestandskorrigiert) als Funktion des Hybridisierungsgrads

Die dargestellten Zyklen sind der NEFZ, der AMS-Zyklus (Auto-Motor-Sport-Zyklus) und der Artemis Motorway Zyklus, also ein synthetischer Mischzyklus, ein städtischer Zyklus zur Verbrauchsmessung und ein Autobahnzyklus [97]. Alle Verläufe zeigen bei steigendem Batterieanteil zunächst einen abfallenden Zyklusverbrauch. Ab einem Minimum zwischen 30 % und 40 % steigen die Verbräuche wieder an. Dieses Verhalten deckt sich mit den Beobachtungen in [96]. Die Verbrauchseinsparungen sind auf die Effekte der Bremsenergierekuperation zurück zu führen. Erwartungsgemäß zeigen sich diese Einsparungen am deutlichsten beim NEFZ und beim städtischen AMS-Zyklus. Bei weiter ansteigender Hybridisierung verschlechtert sich der Wirkungsgrad der Brennstoffzellensysteme. Einerseits steigt der Anteil der Nebenverbraucher, die zum Betrieb des Systems notwendig sind. Andererseits müssen die Systeme bei höheren Stromdichten und damit niedrigeren Wirkungsgraden betrieben werden um noch die gleiche Ausgangsleistung zu liefern. Der dadurch ansteigende Verbrauch zeigt sich besonders deutlich im Autobahnzyklus Artemis Motorway, dessen hoher, konstanter Leistungsbedarf am wenigsten durch einen Batterieanteil abgedeckt werden kann.

Zusätzliche Einflüsse der Betriebsstrategie oder anderer Bordnetzkonfigurationen werden hier vernachlässigt. Für die Hybridisierung wird ein Wert von 30 % für die weitere Auslegung festgelegt. Für ein Antriebssystem mit 100 kW Ausgangsleistung ergibt sich also ein Brennstoffzellensystem mit 70 kW sowie ein Batteriesystem mit 30 kW Ausgangsleistung.

5.3.3 Kostenauswirkungen der Hybridisierung

Um die Kostenauswirkungen der Hybridisierung einschätzen zu können, müssen die Kosten der Batterie- und Brennstoffzellensysteme abgeschätzt werden. An dieser Stelle sollen dazu nur bereits veröffentlichte Daten verwendet werden, um eine Delta-Betrachtung durchzuführen. Die Kosten des Tanksystems und der Leistungselektronik werden hier vernachlässigt. Eine Erweiterung dieser Betrachtung liefert [98]. Die hier beschriebenen Daten basieren auf Betrachtungen aus [99] für die Brennstoffzellenkomponenten und [100] für das Batteriesystem. Spezifische, leistungsabhängige Komponentenkosten beschreibt [99]. Diese können in Gl. 9 zur Bestimmung der Komponentenkosten für verschiedene Hybridisierungsgrade verwendet werden.

$$\text{Komponentenkosten} \quad K_K = k_K \cdot (1 - x_{\text{hybrid}}) \cdot P_{\text{ges}} \quad \text{Gl. 9}$$

Mit: K_K : Komponentenkosten k_K : Spezifische Komponentenkosten (leistungsabhängig)

P_{ges} : Gesamtleistung x_{hybrid} : Hybridisierungsgrad

Abweichungen die gegenüber [99] eingeführt werden, sind:

- Kosten des Brennstoffzellenstapels werden korrigiert um geringere Platinbeladungen zu berücksichtigen (Absenkung von 0,75 mg/cm² in [99] auf 0,4 mg/cm²)
- Lineare Kostenskalierung des Zellstapels wird korrigiert. Für kleinere Zellstapel werden ansteigende spezifische Kosten pro kW angenommen
- Die Kompressorkosten werden bis zu einem Hybridisierungsgrad von 50 % als konstant angenommen. Damit lassen sich die Kompressorkosten nicht unter ein Minimum skalieren

Mit diesen Annahmen lassen sich die Komponentenkosten des Brennstoffzellensystems mit den Daten aus [99] abschätzen. Für die Batterie wird zur Abschätzung eine empirische Gleichung aus [100] verwendet, dargestellt in Gl. 10:

$$\text{Batteriekosten} \quad \frac{\$22}{\text{kW}} \cdot x_{\text{hybrid}} \cdot P_{\text{ges}} + \frac{\$700}{\text{kW}} \cdot E_{\text{Bat}} + 680 \$ \quad \text{Gl. 10}$$

E_{Bat} : Energieinhalt P_{ges} : Gesamtleistung x_{hybrid} : Hybridisierungsgrad

In Gl. 10 zeigt sich der überproportional starke Kosteneinfluss des Energieinhalts im Vergleich zur Batterieleistung. Neben den Betrachtungen zum Energieinhalt in 5.3.1 muss dieser Einfluss berücksichtigt werden. Für die Skalierung der Batterie wird hier zur Abschätzung des Energieinhalts

der Umrechnungsfaktor in Gl. 11 nach [98] verwendet. Diese Abschätzung spiegelt die Form des Ragone-Diagramms in 13.1.1 wieder und gilt für Leistungszellen mit 5 Ah nach [101].

$$\text{Abschätzung Energieinhalt} \quad E_{\text{Bat}} \cong \frac{P_{\text{Bat}}}{20} = \frac{(1 - x_{\text{hybrid}}) \cdot P_{\text{Sys}}}{20} \quad \text{Gl. 11}$$

Mit: E_{Bat} : Energieinhalt Batterie P_{Bat} : Batterieleistung
 P_{Sys} : Leistung BZ-System x_{hybrid} : Hybridisierungsgrad

Die resultierende Kostensumme aus Brennstoffzellensystem und Batteriesystem auf Basis dieser Abschätzungen ist in Abbildung 51 dargestellt. Es werden bewusst keine Extrembereiche des Spektrums (Reines Brennstoffzellenfahrzeug ohne Hybridisierung oder Range-Extender Fahrzeug bei hoher Hybridisierung) dargestellt:

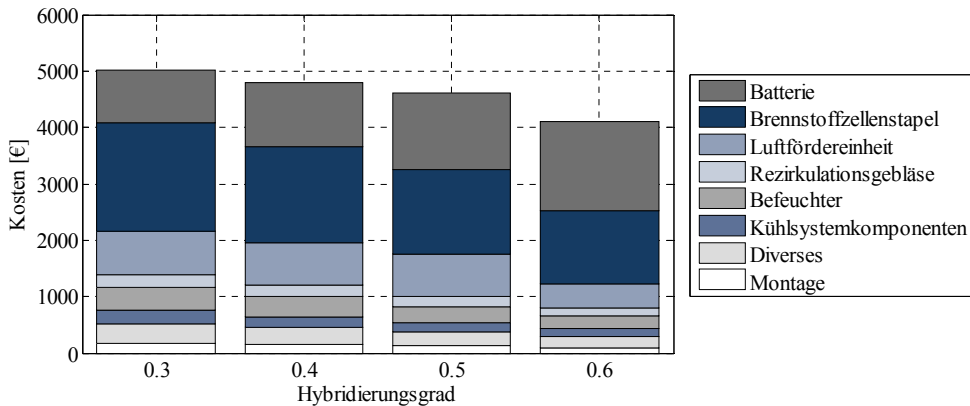


Abbildung 51: Gesamtsystemmaterialkosten als Funktion der Hybridisierung (Basis: [99], [100])

Die sinkenden Kosten des Gesamtsystems bei höherer Hybridisierung muss man aber im Kontext der Fahrzeugnutzung sehen. Aus diesem Grund wurde der Energieinhalt der Batterie in den vorangegangenen Abschnitten bereits mehrfach beschrieben. Eine reine Auslegung nach der Leistung berücksichtigt nicht, dass bei zu starker Verkleinerung des Brennstoffzellensystems keine Konstantfahrt bei erhöhten Geschwindigkeiten mehr möglich ist. Fahrscenarien, die einen dauerhaften Betrieb über 100 km/h oder eine konstante Steigung beinhalten, erfordern einen größeren Brennstoffzellenanteil, da die verfügbare Batteriekapazität in diesen Zuständen zu schnell entladen wird. Das Brennstoffzellensystem darf daher nicht unter die konstante Leistungsanforderung bei Berg- oder Autobahnfahrt verkleinert werden. Dies deckt sich mit den Aussagen aus [90], die für den Fall der konstanten Bergfahrt einen starken Anstieg des notwendigen Energieinhalts beschreiben.

Für ein relevantes Fahrscenario, den Fall der konstanten Steigungsfahrt bei 10 % Steigung und 100 km/h Geschwindigkeit, ergibt sich für die betrachtete Fahrzeugkonfiguration ein konstanter elektrischer Leistungsbedarf von 61,8 kW. Für den Zyklus Artemis Motorway, ergibt sich der in Abbildung 52 dargestellte Leistungsbedarf:

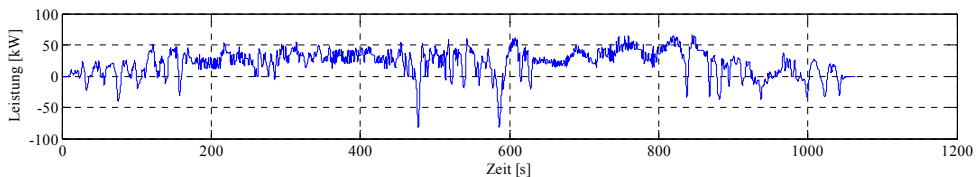


Abbildung 52: Elektrischer Leistungsbedarfs des Artemis Motorway-Zyklus

Die elektrische Leistung beträgt in diesem Fall durchschnittlich 20,9 kW mit einem Maximum bei 64,9 kW. Für das Referenzfahrzeug mit den hier getroffenen Annahmen ist daher ein Hybridisierungsgrad von 30 % ein lokales Optimum, das auch die Konstantleistungsanforderungen der betrachteten Szenarien erfüllt. Dieser Wert wird in allen weiteren Untersuchungen verwendet.

5.4 Dokumentation der Vorauslegung

Die beispielhaft an der Betriebsart „Fahren“ demonstrierte Vorauslegung kann für alle in der Use-Case-Analyse identifizierten Betriebsarten durchgeführt werden. Dabei gelten die vorher identifizierten Auslegungsmerkmale. Grundsätzlich sollen aber noch keine Entwurfsdetails einzelner Subsysteme bestimmt werden. Die meisten Schritte der Vorauslegung liefern grundlegende Design-Entscheidungen, die die spätere Spezifikation und den Entwurf beeinflussen. Um die in der Konzeptbeschreibung der Entwurfsmethodik angekündigte Iteration zu ermöglichen müssen Design-Entscheidungen geeignet erfasst und verfolgt werden. Die zweckmäßige Erfassung von Design-Entscheidungen und deren Begründungen (Design Rationale) ist ein weites Forschungsfeld. Gerade in der Systementwicklung mit der frühen Untersuchung zahlreicher Zielkonflikte ist die Dokumentation der relevanten Ergebnisse und Entscheidungen maßgebend für die Ausarbeitung der Subsystem-Spezifikationen. An dieser Stelle wird aber keine vertiefende Untersuchung zur besten Dokumentationsform durchgeführt. Dieser Punkt kann in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Weiterführende Literatur dazu findet sich beispielsweise in [102], wo die Erfassung von Entscheidungen in gerichteten Graphen diskutiert wird und in [103], wo die Verwendung von Design-dokumentationen untersucht wird. In dieser Arbeit sind die Grundlagen für eine Erfassung von Design-Entscheidungen mit der modellbasierten Notation in SysML und der datenbankorientierten Anforderungssammlung in IBM DOORS geschaffen.

5.5 Zusammenfassung

Auf Basis eines Use-Case-Modells mit identifizierten System-Betriebsarten lässt sich eine Vorauslegung des Systems vornehmen. Dazu werden zentrale Auslegungsmerkmale identifiziert, die als relevante Design-Entscheidungen bereits früh festgelegt werden müssen. Für das dargestellte Beispiel der Betriebsart „Fahren“ des betrachteten Anwendungsbeispiels sind die Systemleistung und der Hybridisierungsgrad des Systems zu bewerten. Eine Längsdynamiksimulation des Referenzfahrzeugs für statische und dynamische Lastszenarien liefert einen elektrischen Leistungsbedarf von maximal 89 kW. Daraufhin werden Systemleistungen von 90 kW und 100 kW für spätere Untersuchungen festgelegt.

Zur Auswahl des Hybridisierungsgrads werden Verbrauchssimulationen und eine Kostenkalkulation für verschiedene Hybridisierungsgrade durchgeführt. Die Analyse der Simulationsergebnisse und der Leistungsbedarfe liefert einen geeigneten Hybridisierungsgrad von 30 %.

Weitere Festlegungen dieser Art werden hier nicht vorgenommen. Die relevanten Auslegungsmerkmale der anderen Betriebsarten werden aufgezählt. Damit steht fest, welche Festlegungen nach der Anforderungsdefinition bestimmt werden müssen.

6 Funktionssicht: Ableitung der Funktionsarchitektur

6.1 Einleitung

Die erste der vier Sichten, mit denen das Antriebssystem im Konzeptentwurf modelliert wird, ist die Funktionssicht. Sie beschreibt die Zerlegung in Produktfunktionen. Die Identifikation der funktionalen Anteile und ihre Strukturierung dienen als Grundlage für den Entwurf der Funktionsarchitektur. Diese ist die zentrale Systembeschreibung, auf deren Basis die Systemaufteilung, die Aufgaben einzelner Bereiche und deren Wirkbeziehungen beschrieben werden.

In den folgenden Abschnitten wird die Funktionsanalyse des Antriebssystems beschrieben. Dazu wird ein Ansatz entwickelt, der es erlaubt, die Funktionen nach den Wirkbeziehungen eines Regelkreises anzuordnen und zu vernetzen. Im Anschluss wird untersucht, wie sich aus dem dadurch gebildeten Funktionsnetzwerk die Funktionsarchitektur durch eine automatisierte Gruppierung der Funktionen systematisch herleiten lässt. Die resultierende Funktionsarchitektur wird detailliert beschrieben.

6.2 Funktionsmodellierung des Antriebssystems

Die Zerlegung in Produktfunktionen ist wie alle anderen Entwurfsschritte der hier beschriebenen Methodik auf das Use-Case-Modell der Anforderungsanalyse zentriert. Den prinzipiellen Ablauf zeigt Abbildung 53:

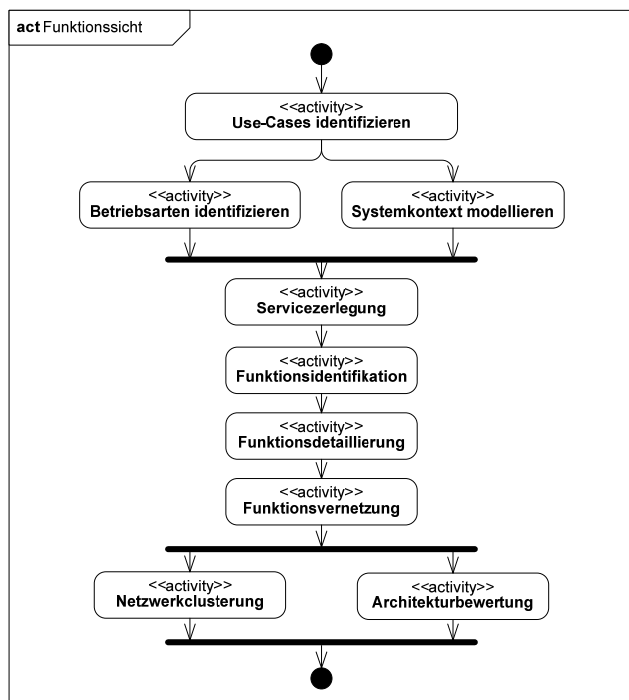


Abbildung 53: Arbeitsfluss für die Teilmethodik der Funktionssicht

Durch die Erfassung möglicher Nutzungsszenarien ist das Use-Case-Modell die zentrale Informationsquelle für die Beschreibung der Systemumgebung und der Betriebsarten des Systems. Wird diese Information als Basis für die weitere Zerlegung in Produktfunktionen genutzt, ist damit in der Modellierung eine geschlossene Kette von der Beschreibung der Systemverwendung bis zur Beschreibung der Funktionsarchitektur herstellbar. Diese durchgängige Kette wird im Folgenden aufgebaut. Von zentraler Bedeutung ist bei dieser Ableitung das Modell der Systemumgebung, der Systemkontext, der in Abbildung 54 den Rahmen des Use-Case-Modells bildet.

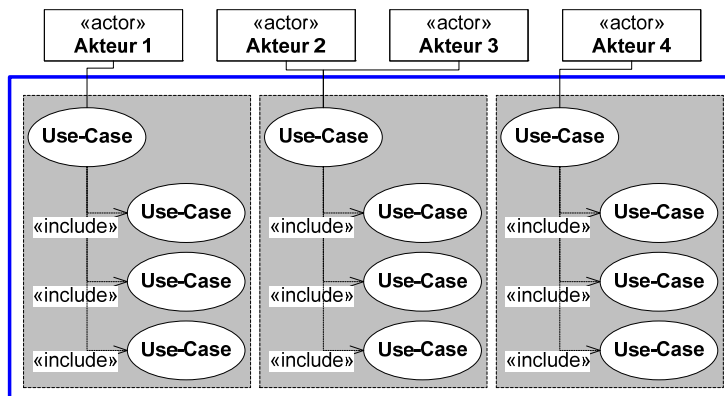


Abbildung 54: Use-Case-Modell des Antriebssystems (Schematische Darstellung)

Der Systemkontext ist gerade bei der Top-Down-Auslegung, wie sie hier beschrieben wird, ein zentrales Element, das sorgfältig modelliert werden muss. Das Modell des Systemkontextes ist in Abbildung 55 dargestellt:

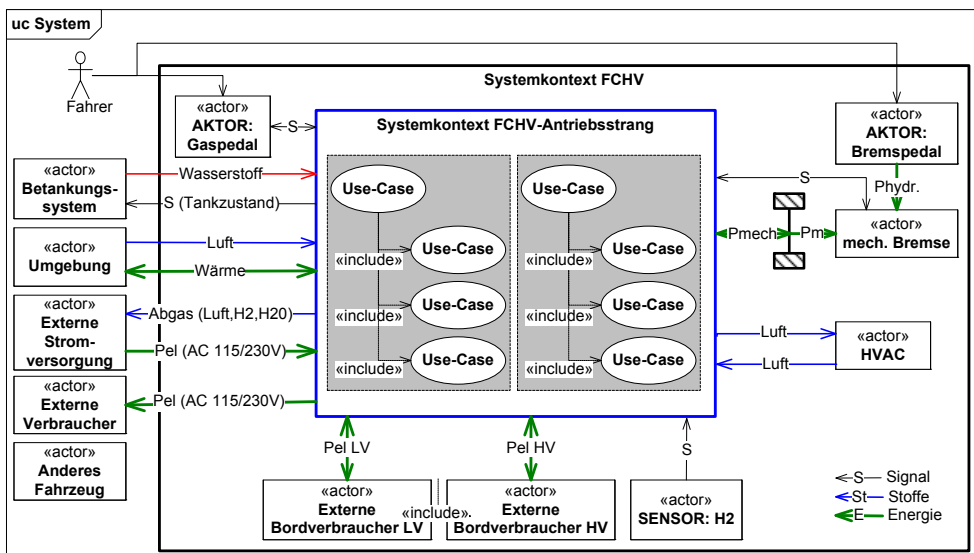
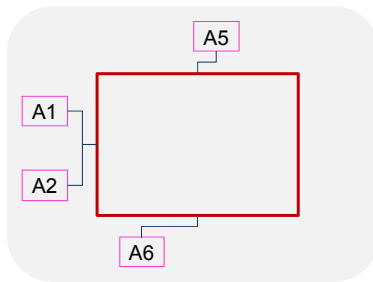


Abbildung 55: Modell des Systemkontextes

Der Systemkontext ist für das Antriebssystem als SysML-Blockdiagramm (block definition diagram) ausgeführt. In der Spezifikation müssen alle hier dargestellten externen Akteure (Systeme, Komponenten, Personen) sowie die Schnittstellen mit dem Antriebssystem beschrieben werden. Üblich ist eine Trennung in einen funktionalen und einen physikalischen Systemkontext. In der physikalischen Vorauslegung werden alle hier dargestellten Schnittstellenflüsse beschrieben.

Die Gruppierung der Use-Cases in Betriebsarten und deren Verwendung als Spezifikationsgrundlage ist ein Hauptmerkmal der in dieser Arbeit entwickelten Methodik. Diese Reduktionstechnik wird hier als Neuerung eingeführt. Alle Modellierungsschritte werden in den ersten Etappen der Erarbeitung für einzelne Betriebsarten durchgeführt und nicht für das Gesamtsystem. Durch diese Strukturierung wird die Bearbeitung des Gesamtsystems vereinfacht; sie stellt eine Strukturierung in Verhaltenselemente dar. Im Gegensatz dazu steht die übliche Strukturierung in technische Elemente (Subsysteme), die zu diesem frühen Zeitpunkt noch nicht konsistent durchgeführt werden kann, da die Subsystemgrenzen noch nicht definiert sind. In Abbildung 56 ist schematisch dargestellt, dass die Betrachtung einer isolierten Betriebsart die gleiche Systemgrenze betrachtet, jedoch nur die in den beteiligten Use-Cases enthaltenen Akteure berücksichtigt.

1.: Isolierte Betrachtung der Betriebsart „Fahren“



2.: Isolierte Betrachtung der Betriebsart „Start“

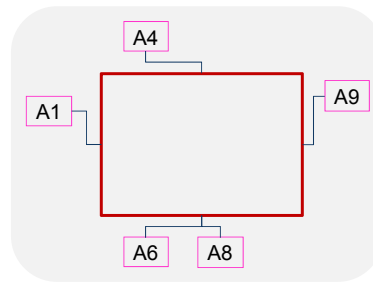


Abbildung 56: Isolierte Betrachtung einzelner Betriebsarten für die Modellierung des Gesamtsystems

Durch die Reduktion auf einzelne Betriebsarten wird daher nicht nur die Komplexität beherrschbar, es bleibt auch die Verfolgbarkeit zu den Use-Cases erhalten. Im Folgenden wird gezeigt, wie alle Entwurfssichten (Funktion, Verhalten, Physik, Zustände) auf der gleichen Zerlegung in Betriebsarten basieren, wodurch auch die Konsistenz zwischen den Entwurfssichten gesichert wird.

Den Einstieg für die hier beschriebene Funktionsanalyse bildet die Überlegung, was an der spezifizierten Schnittstelle vom System bereitgestellt werden muss. In der Softwareentwicklung spricht man in diesem Kontext von bereitgestellten Services. Die Serviceorientierung ist ein wichtiges Analyse- und Designkonzept [104]. Ein Kernmerkmal ist die Aufteilung eines Problems in einzelne Fähigkeiten, die zur Problemlösung notwendig sind („separation of concerns“) [105]. Dadurch lassen sich Teilmodule (Services) aufbauen, die modular und autonom sind und sich wiederverwenden lassen. Einige Merkmale dieser Vorgehensweise lassen sich auf die hier durchgeführte Funktionsanalyse übertragen. Dazu werden an jeder Systemschnittstelle „physikalische Services“ definiert, die zur Bereitstellung der Schnittstellengröße benötigt werden. Dies können sowohl Datenflüsse sein, als auch Stoffflüsse, Kräfte oder Momente. Durch diese Definition werden Merkmale der Serviceorientierung mit der benötigten physikalischen Funktionsmodellierung kombiniert. Nach [104] gelten zwei Kernprinzipien:

- **Modularisierung:** Durch die Modularisierung der Gesamtfunktionalität in einzelne Verhaltensmodule reduziert sich die Gesamtkomplexität. Die Services sind aber zunächst unabhängig von Komponenten. Sie können jedoch später mit diesen in Verbindung gebracht werden [104]
- **Komposition:** Durch Komposition dieser separaten Module lässt sich das gesamte Systemverhalten aufbauen. Daraus resultiert ein modularer Entwicklungsprozess [104].

In der hier betrachteten Modellierung des Antriebssystems stellt ein physikalischer Service damit eine Einheit dar, die man vollständig beschreiben, modellieren und spezifizieren kann. Die Gesamtheit der physikalischen Services muss anschließend zum Gesamtsystemmodell zusammengefügt werden. Zur Darstellung der Modellierungsmethodik wird in den folgenden Abschnitten beispielhaft die Betriebsart „Fahren“ zu einem Funktionsmodell detailliert.

6.2.1 Identifikation der physikalischen Services

Für die Zerlegung der einzelnen Betriebsarten in physikalische Services wird hier folgendes Vorgehen definiert:

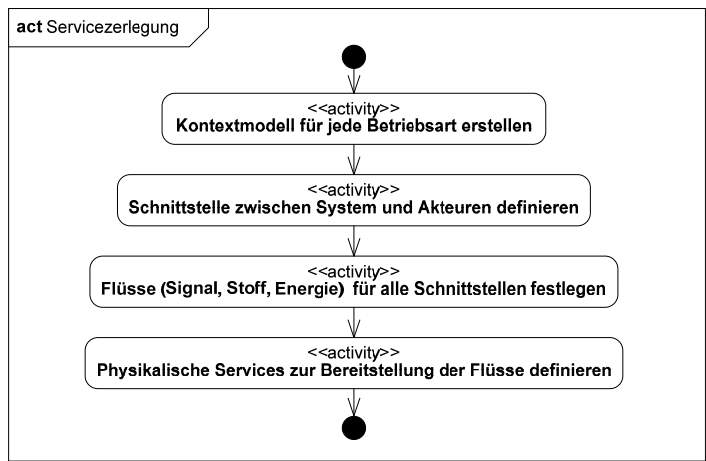


Abbildung 57: Arbeitsfluss für die Servicezerlegung (Erster Schritt der Funktionsmodellierung)

Für jede Betriebsart werden die beteiligten Akteure aus den beteiligten Use-Cases entnommen. Dabei gibt es Input- und Output-Akteure, also solche die Flüsse (Signal, Stoff, Energie) bereitstellen und solche, die mit Flüssen versorgt werden müssen. Bei der Definition der physikalischen Services müssen alle Akteure angebunden sein. Es entsteht ein Funktionsmodell, wie in Abbildung 58 schematisch dargestellt.

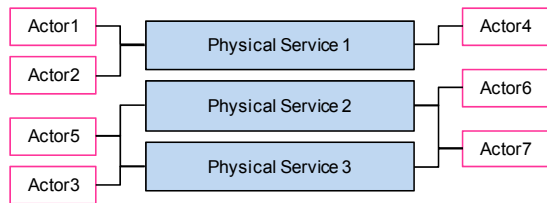


Abbildung 58: Definition physikalischer Services zur Versorgung aller Akteure (schematische)

Im Beispiel „Fahren“ ist das bereitgestellte Drehmoment die primäre Größe, die für den Akteur „Räder“ bereitgestellt werden soll. Es ergeben sich zwei physikalische Services „Drehmoment aufbauen“ und „Drehmoment abbauen“. Das vollständig ausgearbeitete Beispiel für die Betriebsart „Fahren“ findet sich in 16.4. Nach der vollständigen Modellierung liegt eine Zahl von 25 physikalischen Services an 14 Schnittstellen vor. Diese müssen im nächsten Abschnitt weiter detailliert werden

6.2.2 Identifikation der Funktionen

Nachdem die physikalischen Services als wiederverwendbare, modulare Einheiten definiert sind, müssen im nächsten Schritt des Arbeitsflusses aus Abbildung 53 die Kernfunktionen für jede Betriebsart identifiziert werden. Dabei muss ein Interaktionsschema zwischen den Funktionen definiert werden, welches es erlaubt die Funktionen auf hoher Ebene zu verketten und später weitere Detaillierungen einzuführen. Dazu wird hier eine Funktionskapselung definiert, die sich am Aufbau eines Regelkreises orientiert. Abbildung 59 zeigt die Grundelemente eines Regelkreises, bestehend aus dem Regler und der Regelstrecke.

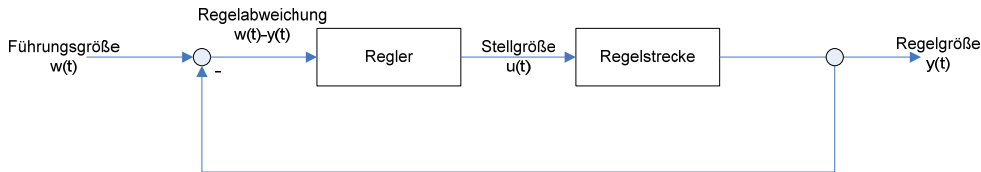


Abbildung 59: Elemente eines Regelkreises

Für die Funktionsidentifikation wird die Bereitstellung der Regelgröße gemäß Def. 5 als Kernaufgabe einer Regelfunktion (Kontrollfunktion) definiert:

Definition: Der Funktionstyp „Kontrollfunktion“ (Cn-Function) beschreibt eine Regelaufgabe und gibt eine Regelgröße aus. Ein physikalischer Service lässt sich vollständig durch Kontrollfunktionen beschreiben. Die Kontrollfunktion gilt als Kapselung für Unterfunktionen.

Def. 5

Zur funktionalen Zerlegung eines physikalischen Services wird demnach eine Kette von Kontrollfunktionen aufgebaut. In dieser Abstraktion ist jeder physikalische Service eine Verkettung von „Regelaufgaben“. Eine Darstellung von Regelfunktionen in Funktionsmodellen wird in [106] gezeigt. Hier wird die Kette allerdings auf einer Ebene vollständig aus diesem Funktionstyp aufgebaut. Eine solche Funktionskette ist von Anfang bis Ende durch den Fluss der zu regelnden Größen verbunden. Erst wenn diese Funktionskette lückenlos ist, ist die Modellierung vollständig. Dabei bildet sich keine reine Funktionshierarchie aus, sondern auch parallele Flüsse. Bei dieser Technik der Funktionsidentifikation können zudem einzelne Kontrollfunktionen mehrfach auftreten. Dies ist erwünscht, da sich dadurch bei zunehmendem Modellierungsfortschritt eine steigende Zahl an Zusammenhängen zwischen den einzelnen Funktionssträngen ergibt. Die physikalischen Services, die dann als Kapselung der kompletten Funktionskette angesehen werden können, vereinfachen die Analysearbeit. Die Kontrollfunktionen stellen aber Verbindungen zwischen den einzelnen Services her, wenn sich gleiche Anteile der Funktionsstränge in mehreren Services ergeben. Abbildung 60 zeigt schematisch, wie sich ein Bild des Gesamtsystems ergibt, dass vollständig mit Kontrollfunktionen beschrieben ist.

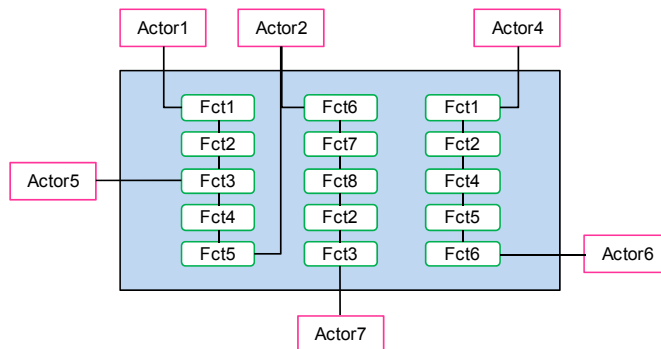


Abbildung 60: Vollständige Systemzerlegung in Kontrollfunktionen (Schematische Darstellung)

Diese erste Funktionsstruktur ähnelt den Analyseformen, wie sie in [20] oder [21] beschrieben werden. Allerdings werden die Funktionsketten bei der Definition der Kontrollfunktionen nach dem Kontrollfluss gestaltet. Dabei können explizit auch rein logische Elemente eingefügt werden, die keinen stofflichen Bezug haben. Für Funktionsanalysen mit Softwareanteilen ist eine solche Darstellung notwendig.

Bei der Zerlegung auf dieser Ebene müssen zum ersten Mal Entwurfsentscheidungen explizit berücksichtigt werden. Die Funktionszerlegung lässt sich logisch durch die Flussgrößen aufbauen. Dennoch sind an dieser Stelle üblicherweise Wirkprinzipien oder Produktmerkmale in der Spezifikation gefordert, die in Funktionselemente berücksichtigt werden müssen. In den Funktionsmodellen mit Elementen der SysML kann man Anforderungen oder Entwurfsentscheidungen als Kommentarblöcke einfügen. Dadurch lässt sich der Entwurf nachvollziehbar dokumentieren. In der Ausgestaltung der Funktionskette für das hier interessierende Beispiel wird auf diese Weise eine zweite Energiequelle berücksichtigt, da die Möglichkeit der Hybridisierung und Bremsenergieerückgewinnung gefordert ist. Außerdem wird über dem eigentlichen Drehmomentaufbau die Kette zur Berechnung des Soll Drehmoments aus den Pedalsignalen angeordnet. Diese ist aus Standardverfahren bekannt [107], [108]. Die Zerlegung in Kontrollfunktionen ist für den physikalischen Service „Drehmoment bereitstellen“ in 16.4 dargestellt. Nach der Zerlegung aller physikalischen Services in Kontrollfunktionen liegt für das betrachtete Antriebssystem eine Struktur aus 110 Kontrollfunktionen vor.

6.2.3 Detaillierung der Funktionen

Jede Funktionszerlegung lässt sich theoretisch immer weiter verfeinern. Der angewandte Detaillierungsgrad ist laut [20] beispielsweise vom Neuigkeitsgrad des Produkts und der Lösungs-suche abhängig. Eine hohe Detailtiefe ist dann sinnvoll, wenn die grundlegenden Wirkprinzipien und die Produktstruktur noch nicht feststehen. Für die hier durchgeführte Analyse wird gemäß Abbildung 53 ein Schritt der Funktionsdetaillierung durchgeführt. Das Interaktionsschema der Kontrollfunktionen ist so angelegt, dass die Kontrollfunktionen auf einer hohen Ebene verkettet werden können. Als Detaillierung werden die Teilfunktionen des Regelkreises verwendet. Damit gilt Def. 6

Definition: Jede Kontrollfunktion wird durch die drei Funktionselemente Messen (Sense Function), Wandeln (Physical/Logic Function) und Senden (Send Function) beschrieben.

Def. 6

Wird diese Zerlegung in drei Unterfunktionen konsequent angewandt, entsteht für jede Kontrollfunktion eine Hierarchie, wie sie in Abbildung 61 dargestellt ist:

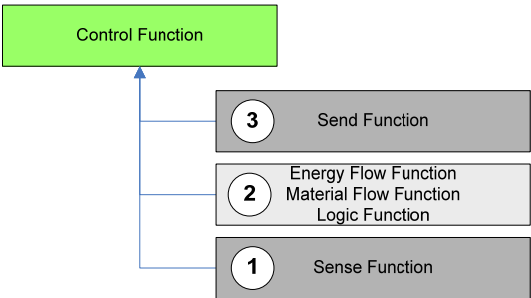


Abbildung 61: Hierarchie der Unterfunktionen einer Kontrollfunktion gemäß Def. 6

In einer Notation als Graph, lassen sich die Unterfunktionen einfach wie in Abbildung 61 anordnen. Für die Darstellung in der modellbasierten Notation lassen sich die Funktionselemente oder Unterfunktionen in den Blockeigenschaften eintragen. Abbildung 62 zeigt einen Ausschnitt aus der Funktionsstruktur des Brennstoffzellensystems.

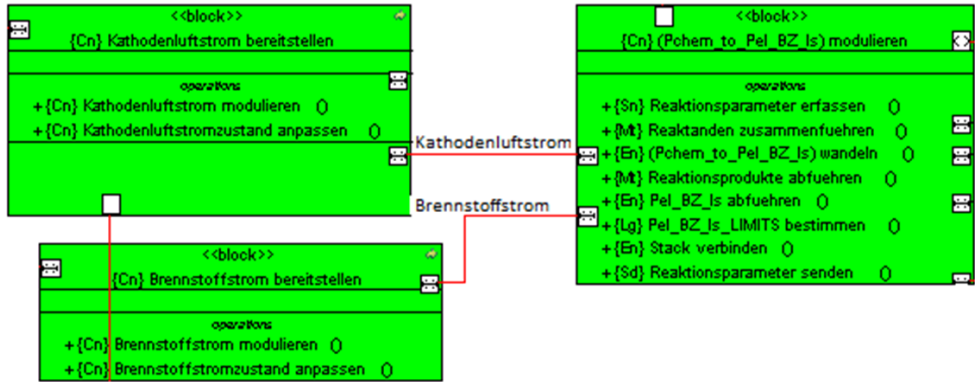


Abbildung 62: Ausschnitt der Funktionsstruktur des Brennstoffzellensystems

Im rechten Teil der Abbildung ist die Funktion des Brennstoffzellenstapels abgebildet. Als Unter-elemente sind die Messung und Bereitstellung der Reaktionsparameter aufgeführt. Dazwischen sind Energie- und Stoffwandlung angeordnet. Diese Unterfunktionen lassen sich in SysML in einem Untermodell darstellen. Das vollständige Modell ist in 16.4 dargestellt. Die hierarchische Darstellung ist aus Gründen der Übersichtlichkeit sinnvoll. Auf dieser Analyseebene ergibt sich für die Funktionsmodellierung des Antriebssystems im Anwendungsbeispiel eine Anzahl von 446 Detailfunktionen. Diese Funktionsmenge lässt sich in gewöhnlichen Listenstrukturen nicht mehr sinnvoll verarbeiten. Mit abgeschlossener Zerlegung ist eine Datenstruktur gemäß Abbildung 63 aufgebaut:

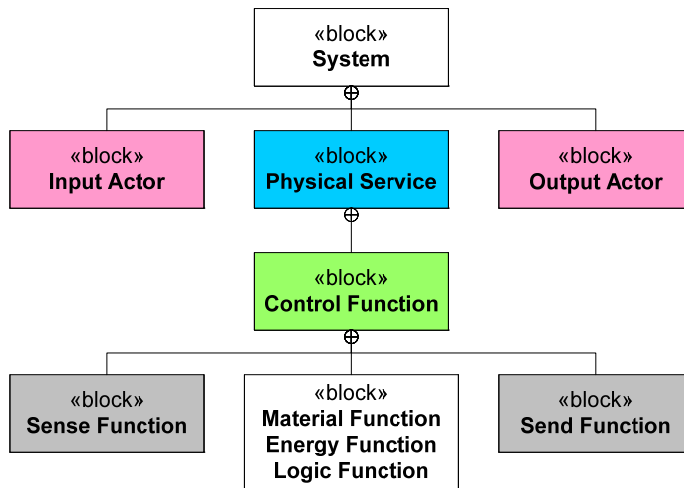


Abbildung 63: Datenstruktur des Funktionsgraphen nach vollständiger Zerlegung

Zur Beschreibung des Systems sind jetzt parallele Funktionsbäume unter jedem physikalischen Service angeordnet. Diese Funktionsbäume müssen verkettet werden, um eine durchgängige Systembeschreibung aufzubauen.

6.2.4 Vernetzung der Funktionen

Der zentrale Schritt des Arbeitsflusses aus Abbildung 53 ist die Funktionsvernetzung. Auf Basis dieser Vernetzung soll die Funktionsstruktur durch eine Clusterung in eine Subsystemstruktur überführt werden. Die in 6.2.2 eingeführte Funktionskapselung mittels der eingeführten Kontrollfunktionen bildet die Grundlage dafür. Abbildung 64 zeigt den Arbeitsfluss für den Schritt der Funktionsvernetzung:

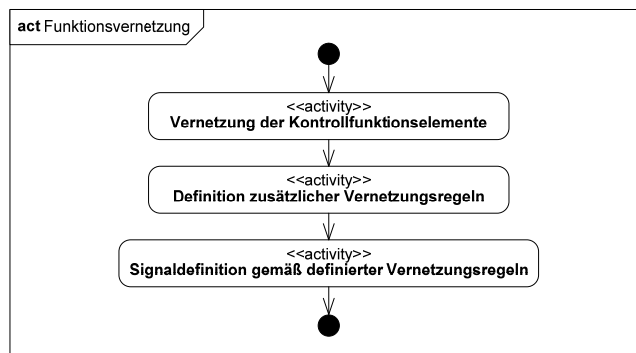


Abbildung 64: Arbeitsfluss der Funktionsvernetzung (Letzter Schritt der Funktionsmodellierung)

Zunächst werden die Unter Elemente der Kontrollfunktion vernetzt. Im Anschluss werden zusätzliche Vernetzungsregeln definiert und als Signal-, Energie-, oder Stoffflüsse im Modell hinterlegt. Als formale Vernetzungsgrundlage für die Unterfunktionen werden die Funktionen aus Abbildung 61 in ihrer Wirkstruktur als Regelkreis gemäß Abbildung 59 angeordnet. Dadurch ergibt sich für jede Kontrollfunktion die Struktur, die in Abbildung 65 dargestellt ist:

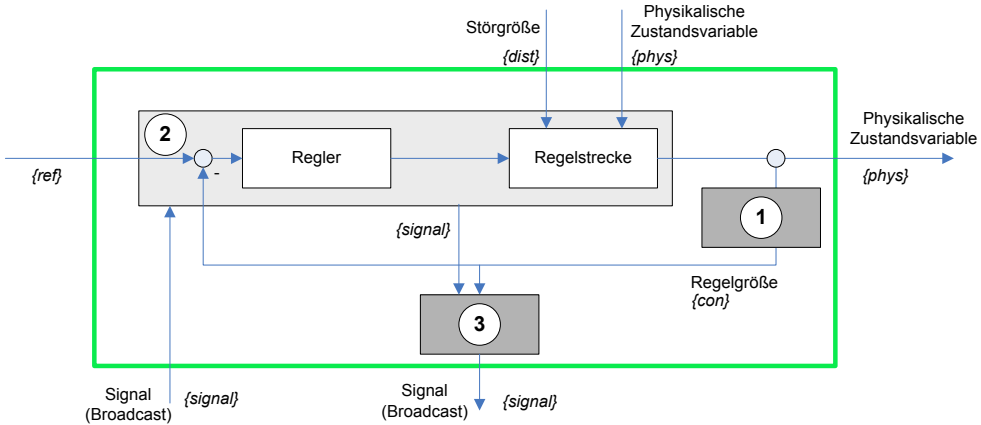


Abbildung 65: Wirkstruktur der Funktionselemente innerhalb einer Kontrollfunktion

Die Funktion, die die physikalische Umwandlung beschreibt, entspricht einer Abdeckung von Regler und Regelstrecke. Die Sendefunktion entspricht beispielsweise einer Signalbereitstellung auf einem Bus oder einer Analog-Digital-Wandlung. Die Messfunktion nimmt die physikalische Zustandsvariable auf und gibt eine entsprechende Regelgröße aus. Im Funktionsmodell werden alle Funktionseinträge mit diesen Daten-, Energie- oder Stoffflüssen erweitert. Die Endungen „signal“, „con“ und „phys“ dienen später dem Auswertalgorithmus als Kennzeichnung des Funktionstyps. Die durch diesen Vernetzungsschritt hergestellte Funktionsstruktur zeigt Abbildung 66. Durch die mehrfache Verwendung einzelner Kontrollfunktionen liegen an dieser Stelle keine isolierten Funktionsbäume mehr vor. Vielmehr sind schon Verbindungen zwischen den einzelnen Bäumen hergestellt.

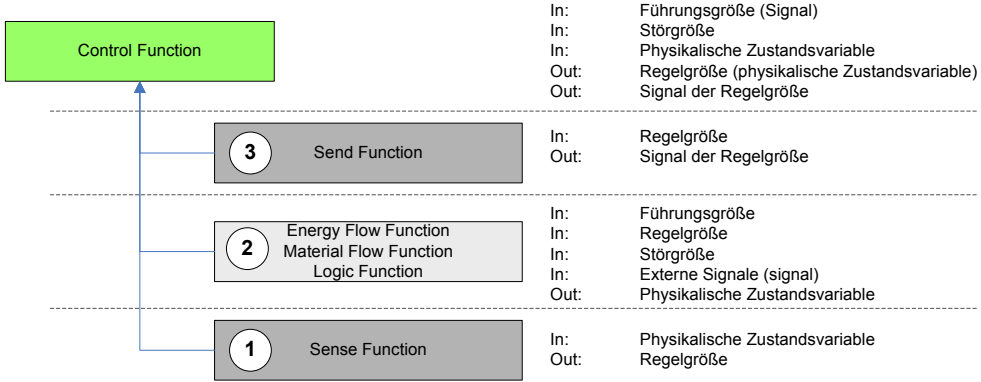


Abbildung 66: Elemente einer Kontrollfunktion mit den zugehörigen Verbindungsgrößen

Die Vernetzung über die Regelkreissystematik wird im zweiten Schritt durch eine zusätzliche regelbasierte Vernetzung erweitert. Wie in 6.2.2 beschrieben wurde, ist die Funktionszerlegung in wesentlichen Teilen ein Entwurfsschritt. Dabei werden Funktionsstrukturen so aufgebaut, dass die geforderten Produktmerkmale realisiert werden können. Die Grundlage bildet das Wissen der Entwickler oder bereits bekannte funktionale Strukturen. Ein Beispiel für bereits bekannte Wirkstrukturen sind beispielsweise die grundlegende Systemverschaltung des Brennstoffzellensystems, die Anordnung der Elektromotoransteuerung oder die Koordination des Radmoments im Fahrzeug. Abbildung 67 zeigt als Beispiel die Verbindungen, die im Funktionsmodell rein generisch als Verbindung zwischen funktionalen Elementen der Momentenkoordination eingetragen werden:

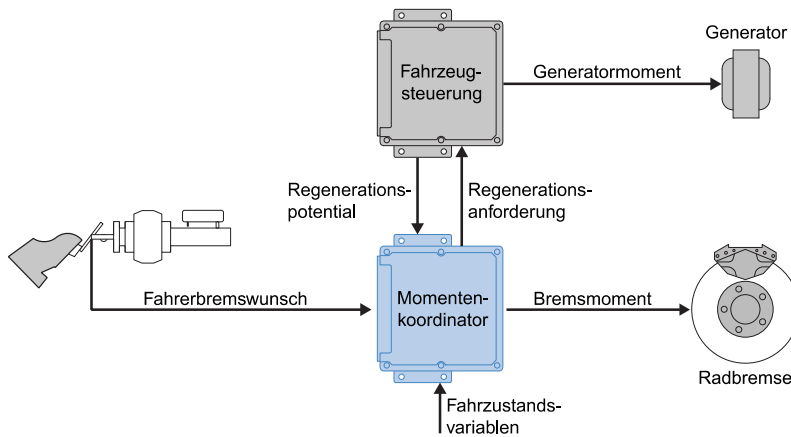


Abbildung 67: Bekannte Wirkstruktur, die in der Funktionsvernetzung berücksichtigt wird [109]

Strukturen dieser Art können als Entwurfsregeln dokumentiert werden. Die Daten-, Stoff-, und Energieflüsse werden im Funktionsmodell abgebildet. In Kombination mit der formalen Vernetzung der Regelkreiselemente in den Funktionsmodellen wird dadurch ein vollständiger Funktionsgraph aufgebaut. Die Knoten dieses Graphen sind die Funktionen. Die Kanten sind die definierten Verbindungen, die alle über einen konkreten Verbindungstypen verfügen. Zur Erstellung dieser Graphen in Matrixform wurde eine Matlab-Werkzeugkette implementiert. Der Bearbeitungsablauf ist in Abbildung 68 schematisch dargestellt:

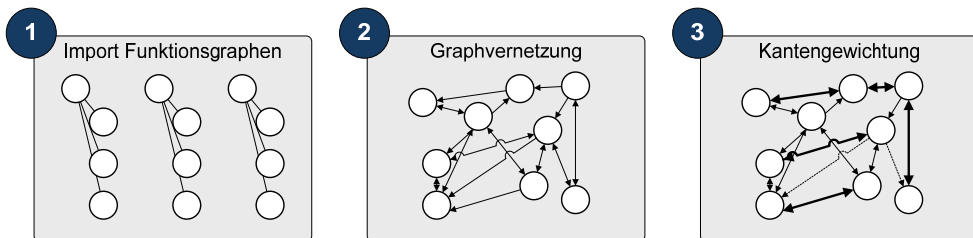


Abbildung 68: Werkzeugkette von den Funktionsbäumen zum vernetzten und gewichteten Graphen

Die graphisch erstellten Funktionsbäume werden über ein Textformat importiert. Ein einfacher Suchalgorithmus liest die Elemente der Funktionsbäume ein und sucht doppelte Funktionseinträge sowie Sender und Empfänger eingetragener Stoff-, Energie-, oder Datenflüsse. Die Kanten des dadurch aufgebauten Graphen werden nach einem vorgegebenen Gewichtungsschema bewertet. In den Standardeinstellungen gilt die Gewichtung Signalfluss:1, Energiefluss:3, Stofffluss:9. Dadurch wird berücksichtigt, dass Funktionen, die Gas- und Kühlmittelströme beinhalten, zwingend nah beieinander angeordnet werden müssen. Die Funktionsstruktur kann dabei entsprechend dem hier gewählten Vernetzungsschema auf verschiedenen Ebenen betrachtet und analysiert werden.

Eine Betrachtung auf Ebene der Einzelfunktionen stellt alle Knoten und Verbindungen dar. Abbildung 69 zeigt eine Visualisierung des Funktionsnetzwerks in Einzelfunktionen. Die physikalischen Stoffflüsse (Wasserstoff, Luft, Kühlmittel) sind blau hervorgehoben:

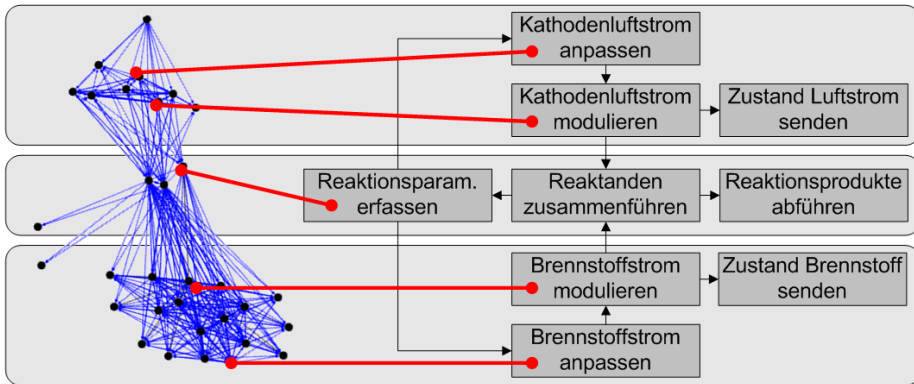


Abbildung 69: Funktionsgraph mit Darstellung der physikalischen Flüsse

Im unteren Bereich von Abbildung 69 ist der dicht vernetzte Bereich der Funktionen des Wasserstoff-Subsystems zu erkennen. In diesem Bereich finden sich Punkte, die Funktionen, wie „*Brennstoffstrom modulieren*“ oder „*Brennstoffstrom anpassen*“ repräsentieren. Alle diese Funktionen sind durch den Stoffstrom des Wasserstoffs miteinander verbunden. Zusätzlich gibt es eine Fülle von Datenverbindungen, die beispielsweise den Zustand des Stoffstroms erfassen und von Sensoren oder Berechnungen stammen. Im oberen Teil der Abbildung sind die Punkte dargestellt, die die Funktionen des Kathodenluft-Subsystems darstellen. In diesem Bereich finden sich Punkte wie „*Kathodenluftstrom anpassen*“ oder „*Kathodenluftstrom modulieren*“. Sie sind durch den Stoffstrom der Luft miteinander verbunden. Ein zentraler Knoten an der Spitze des Graphen repräsentiert die zentrale Luftzufuhr des Fahrzeugs. Neben dem Brennstoffzellensystem werden auch alle Kühlkreisläufe mit dieser Luft versorgt. Der Brennstoffzellenstapel steht als zentraler Knoten in der Mitte des Graphen. An dieser Stelle fließen Stoffströme aus Luft-, Wasserstoff- und Kühlsystem zusammen. Die Punkte repräsentieren Funktionen, wie „*Reaktanden zusammenführen*“ oder „*Reaktionsprodukte abführen*“.

Die Visualisierung der Netzwerke hat für nachfolgende Untersuchungen keinen weiteren Nutzen. An dieser Stelle soll lediglich verdeutlicht werden, dass bei konsequenter Funktionsmodellierung die komplette Produktstruktur iterativ erzeugt wird. Dadurch lässt sich eine Vielzahl von Wechselwirkungen erkennen, obwohl die Modellierung auf der rein theoretischen Funktionsebene stattfindet. Das architekturbasierte Arbeiten in Strukturen, wie der in Abbildung 62 ausschnittsweise gezeigten SysML-Modellierung reduziert die Komplexität für den Bearbeiter jedoch deutlich.

Neben den physikalischen Verbindungen in Abbildung 69 lässt sich auch das Netzwerk der eine Ebene höher angesiedelten Kontrollfunktionen analysieren. Eine Betrachtung auf Ebene der Kontrollfunktionen reduziert die Menge der Knoten. Dieses Netzwerk zeigt Abbildung 70:

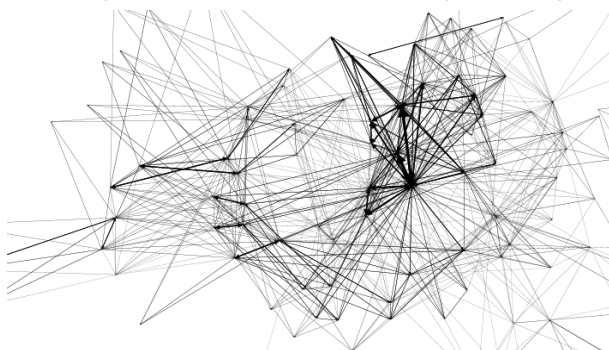


Abbildung 70: Funktionsgraph mit Darstellung der Kontrollflüsse

Für das reduzierte Netzwerk der Kontrollfunktionen werden die Gewichtungen der Verbindungen der hierarchisch untergeordneten Funktionen zusammengefasst. Die Gewichte werden für jedes Knotenpaar addiert, wie in Gl. 12 dargestellt. Die Gewichtung ist in Abbildung 70 als Kantendicke dargestellt.

$$g_{cn} = \sum_{i=1}^K g_{fi} \quad \text{Gl. 12}$$

Mit: g_{cn} : Gewichtung Kante Kontrollfunktion K : Alle Kanten an Funktion i
 g_{fi} : Gewichtung Kante Funktion i

Auf der Grundlage dieser Netzwerke kann nachfolgend eine Netzwerkanalyse und eine Identifikation sinnvoller Subsystemstrukturen durchgeführt werden.

6.3 Implementierung des Verfahrens zur Subsystemdefinition

Der letzte Schritt des Arbeitsflusses in Abbildung 53 ist die Identifikation der Subsystemgrenzen und die Festlegung der modularen Produktstruktur. Anhand der bisher identifizierten hohen Funktionsanzahl und der graphischen Darstellungen wird deutlich, dass eine effiziente Partitionierung in Subsysteme nicht manuell durchgeführt werden kann. Um eine geeignete Systempartitionierung zu erzeugen soll die bisher aufgebaute Werkzeugkette daher um ein Verfahren zur Clusterung des Netzwerks erweitert werden. Dadurch wird eine schnelle, erste Systemstrukturierung hergeleitet, die danach auf der Basis weiterer Kriterien nachbearbeitet werden kann. Basierend auf dem Methodenüberblick in 14.1 sind Clusterverfahren mit Standardalgorithmen, wie in [39] dargestellt geeignet. Matrixbasierte Verfahren, wie in [110] oder [111] beschrieben, werden ebenfalls betrachtet und experimentell verglichen. In diesem Abschnitt wird eine experimentelle Untersuchung beschrieben, welche die Effektivität der Clusterung belegt. Für die verwendeten Techniken werden außerdem die am besten geeignete Funktionsmatrix und geeignete Parameter der Algorithmen bestimmt. Die Auswahl des Clusteralgorithmus erfolgt basierend auf den Grundlagen in 14 und den hier definierten Anforderungen an das Verfahren.

Die Identifikation der Module lässt sich prinzipiell mit allen bisher erzeugten Netzwerken durchführen. Drei Arten von Interaktionsmatrizen werden als Teil der Werkzeugkette automatisiert aufgebaut:

- $\overline{PHYS}_{n,p}$: Interaktionsmatrix aller Funktionen reduziert auf Energie- und Stoffflussverbindungen
- $\overline{CN}_{n,p}$: Interaktionsmatrix der Kontrollfunktionen
- $\overline{CNACT}_{n,p}$: Abhängigkeitsmatrix zwischen Kontrollfunktionen und Systemaktivitäten aus der Use-Case-Zerlegung (siehe Modellierung der Ablaufsicht in 8)

Um die Abhängigkeitsmatrix zwischen den Kontrollfunktionen und den Systemaktivitäten zu erzeugen, wird der Bezug zur Use-Case-Modellierung verwendet. Sowohl bei der Definition der physikalischen Services als auch bei der Zerlegung der Use-Cases in Aktivitäten (siehe Definition in 8.2.1) wurden Use-Case-Bezüge benannt. Die physikalischen Services sind, wie in Abbildung 58 dargestellt, bestimmten Systemschnittstellen zugeordnet. Jeder Use-Case, der mit dieser Schnittstelle in Kontakt steht, wird entsprechend dem physikalischen Service zugeordnet. Dadurch entsteht die Verbindungsmatrix $CNUC$ als spärliche Matrix:

$$\overline{CNUC} = \begin{bmatrix} 1/0 & \dots & 1/0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/0 & \dots & 1/0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 13}$$

Für die Zerlegung der Use-Cases in Aktivitäten gilt ein direkter Bezug. Dadurch lässt sich die Verbindungsmatrix $UACT$ erzeugen, ebenfalls eine spärliche Matrix:

$$\overline{UACT} = \begin{bmatrix} 1/0 & \dots & 1/0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/0 & \dots & 1/0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 14}$$

Über ein Vektorprodukt lassen diese Matrizen gemäß Gl. 15 zur gesuchten Abhängigkeitsmatrix verknüpfen. Dabei wird der Use-Case-Bezug eliminiert:

$$\overline{CNACT} = \overline{CNUC} \times \overline{UACT} \quad \text{Gl. 15}$$

Nach dem Aufbau der Zielmatrizen folgt die Anwendung der Clusteralgorithmen. Das in Matrixform überführte Funktionsmodell lässt sich prinzipiell sowohl mit direkt implementierten Clusteralgorithmen als auch mit matrixbasierten Sortieralgorithmen bearbeiten, die beide in 14.2 beschrieben

wurden. Das verwendete Verfahren sollte sowohl in der Lage sein, die relativ große Elementzahl von über 300 Funktionen effizient zu verarbeiten. Es sollte außerdem in der Lage sein, die mit verschiedenen Gewichten belegten Elementverbindungen zu verarbeiten. Ein reines Binärverfahren ist damit ausgeschlossen. Die Zuordnung von Funktionselementen zu mehreren Modulen ist zu vermeiden.

6.3.1 Auswahl und Implementierung der Algorithmen

Aufgrund der vorangegangenen Überlegungen wird ein partitionierender Algorithmus gewählt. Ein Algorithmus der K-Means-Familie bietet dabei den besten Kompromiss aus Ergebnisgüte, Effizienz und Implementierungskomplexität. Er ist außerdem vollständig in die bisherige Werkzeugkette integrierbar. Als Vergleichsverfahren wird eine Bearbeitung als Design Structure Matrix mit einem Algorithmus nach [40] gewählt. Zu beiden Verfahren werden hier nur die relevantesten Entwurfsentscheidungen dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Algorithmen und der entsprechend erstellten Auswerteprogramme ist in 14.3.3 hinterlegt.

Vor der Implementierung des K-Means-Algorithmus müssen zwei Entscheidungen getroffen werden. In 14.3.2 war bereits beschrieben worden, dass für die Anwendung des K-Means-Algorithmus ein Ähnlichkeitsmaß, eine sogenannte Distanznorm gewählt werden muss. Außerdem ist die Vorgabe der Initialzentren für die Clusterung entscheidend. Bei diesem auch „*Seeding*“ genannten Schritt müssen Anzahl und Lage dieser Initialzentren ausgewählt werden. Beide Bearbeitungsschritte wurden für das Clusterverfahren implementiert.

6.3.1.1 Auswahl und Implementierung der Distanznorm

Nach der Vernetzung der Funktionsketten und dem Import in die matrixbasierte Verarbeitung in Matlab muss das Ähnlichkeitsmaß (die Distanznorm) für die Funktionsterme definiert werden. Aufgrund der mehrdimensionalen Matrixdarstellung ist ein Standardmaß, wie die euklidische Distanz nicht geeignet. Vielmehr wird das Auftreten von Einsen und Nullen in den einzelnen Matrixzeilen nach Gesetzen der Mengenlehre verglichen. Für die einzelnen Vektorzeilen der Matrix wird ein geeignetes Ähnlichkeitsmaß gesucht. Eine Zeile der Matrix entspricht daher einer binären Codierung für das Funktionselement. Für die Anwendung auf die Funktionsmatrizen des Anwendungsbeispiels lassen sich folgende Anforderungen für die Ähnlichkeitsmessung innerhalb der Funktionsnetze festhalten:

- Die Distanznorm muss beide Matrixausgaben (Kontrollfunktionsmatrix und Verhaltensflussmatrix) sinnvoll verarbeiten können, auch wenn Matrixeinträge über viele identische Elemente verfügen.
- Die Implementierung muss über eine hohe Rechengeschwindigkeit verfügen, da die Anzahl der zu berechnenden Distanzen mit der Funktionszahl exponentiell steigt (Bei einer Funktionsanzahl n gilt für die Anzahl der Verbindungen c : $c = n(n - 1)/2$). Alle Abstände müssen für jeden Clusterungsschritt wiederholt werden.
- Das Distanzmaß muss sich sinnvoll in eine Straffunktion einbinden lassen um ein Clusterungsverfahren aufzubauen, das für die Systempartitionierung gute Ergebnisse liefert.

Zur experimentellen Erprobung der Clusterverfahren wurden vier verschiedene Distanznormen implementiert. Die „*Jaccard-Distanz*“, die „*Simple-Matching-Distanz*“, die „*Dice-Distanz*“ und die „*Tanimoto-Distanz*“. Diese können alle auf die dargestellten Funktionsmatrizen angewendet werden. Die Eignung für die Verwendung im Gruppierungsalgorithmus wird in den folgenden Abschnitten experimentell ermittelt.

Eine Besonderheit gilt bei der Verarbeitung der kombinierten Matrix aus Kontrollfunktionen und Systemaktivitäten CNACT. In diesem speziellen Fall wird ein zusätzlicher Gewichtungsvektor C aus dem Netzwerk der Systemaktivitäten gebildet. Dieser hat das Ziel, die Abstandsmatrix $D_{Elemente\ ij}$ so zu manipulieren, dass ein enger Zusammenhang im Aktivitätsnetzwerk das Ergebnis der späteren Clusterung beeinflusst. In Versuchen führte der folgende exponentielle Zusammenhang zu den besten Ergebnissen.

$$C = \frac{1}{10^\sigma} \quad \text{Gl. 16}$$

Mit Hilfe der so definierten Distanznormen wurden Versuche zur Subsystemdefinition durchgeführt. Weitere Erläuterungen zu Definition und Implementierung der Distanznormen finden sich in 14.3.1.

6.3.1.2 Implementierung des Clusteralgorithmus

Die für das Anwendungsbeispiel realisierte Implementierung des K-Means-Algorithmus kombiniert eine bekannte Schrittfolge mit angepasster Distanznormberechnung und einer Vorauswahl der Startzentren („*Seeding*“). Die Schrittfolge basiert auf der iterativen Realisierung von [tek12a]. Der Auswahlsschritt für die Startzentren, mit denen die Clusterung startet basiert auf einer geeigneten Voranalyse mit graphischer Darstellung. Diese erlaubt eine sinnvolle Angabe für die Anzahl der Startzentren, die bei diesem Algorithmus immer manuell vorgegeben werden muss. Die Startzentren selbst werden dann automatisch ausgewählt. Weitere Details und die entsprechenden graphischen Darstellungen finden sich in 14.3.3. Mit den Funktionen zur Distanznormberechnung und zur Vorauswahl der Startzentren („*Seeding*“) ergibt sich ein relativ einfaches und robustes Verfahren. Dadurch ergibt sich ein schneller Durchlauf mit einer geringen Schrittzahl und wiederholbaren Ergebnissen. Die Ergebnisse der Clusterexperimente werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

6.3.1.3 Implementierung des matrixbasierten Verfahrens

Dem Clusteralgorithmus soll auch ein matrixbasiertes Sortiervverfahren gegenüber gestellt werden, um eine Vergleichsgrundlage zu schaffen. Ergebnisse der Systempartitionierung beider Verfahren können damit auf Ergebnisgüte und Rechengeschwindigkeit geprüft werden.

Um den Implementierungsaufwand in Grenzen zu halten, wurde dazu der Algorithmus nach [40] gewählt. Für diesen Algorithmus sind Beispielimplementierungen verfügbar, die direkt auf die Funktionsmatrizen angewendet werden können. Außerdem ist er die Grundlage für weitere Arbeiten, die auf dem Algorithmus von Thebeau aufbauen. Weitere Erläuterungen dazu, sowie die Beschreibung des Algorithmus finden sich in 14.3.5.

6.4 Erprobung des Verfahrens zur Subsystemdefinition am betrachteten Anwendungsbeispiel

Um zu untersuchen ob das Vorgehen aus Funktionsvernetzung und Gruppierung zu Subsystemen erfolgreich ist, wurde eine Reihe von Clusterungsexperimenten durchgeführt. Das Ergebnis der automatischen Gruppierung wurde sowohl hinsichtlich Berechnungseffizienz als auch hinsichtlich inhaltlicher Relevanz der erzeugten Subsystemstruktur geprüft. Dazu wurden folgende Schritte durchgeführt:

1. Aufbau einer geeigneten Architekturreferenz als Bewertungsmaßstab (basierend auf einem vorhandenen Referenzsystem nach [112] für einen elektrischen Antriebsstrang mit Brennstoffzellen)
2. Geeignete Variation der relevanten Parameter und Durchführung von Experimenten
3. Bewertung der Modulbildung nach Kenngrößen der Algorithmen (Durchlaufzeit, Zyklenzahl, etc.)
4. Bewertung der Modulbildung nach Kennzahlen der Graphen-Theorie (Clusterkoeffizient, Zentralität, etc.)
5. Bewertung der Modulbildung nach Funktionsinhalt anhand der Referenzarchitektur aus [112]

6.4.1 Referenzarchitektur zur Bewertung der Systempartitionierung

Die Darstellung der Clusterergebnisse erfolgt einerseits als SysML-Package-Diagramm; damit werden die Funktionsgruppen und ihre Subsystemzuteilung dargestellt. Andererseits wird auch ein Graph des partitionierten Systems mit entsprechender Visualisierung aufgebaut. Dieser dient der Bewertung der Modularität der entstandenen Struktur. Das Ziel ist hier wenige, schlanke Schnittstellen und in sich geschlossene Module zu erhalten. Um das Referenzsystem mit der Funktionsmodellierung vergleichbar zu machen, wurden die modellierten Funktionsinhalte manuell den Subsystemen des Referenzsystems zugeordnet. Die so gebildeten Funktionsgruppen des Referenzsystems sind in Abbildung 71 dargestellt:

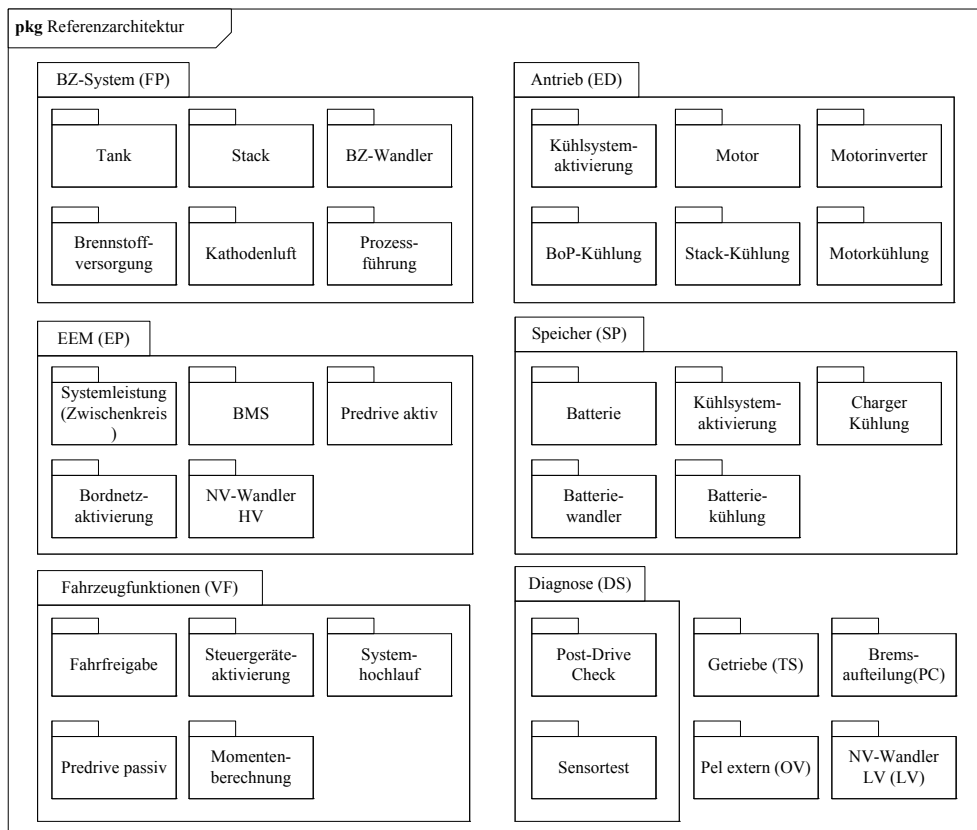


Abbildung 71: Betrachtete Referenzarchitektur - Packaging-Diagramm der Funktionskomponenten (Mit FP: First Power Source, SP: Second Power Source, ED: Electric Drive, EP: Electric Power (EEM: Elektrisches Energiemanagement, NV: Nebenverbraucher), VF: Vehicle Functions, DS: Diagnose, TS: Transmission System, PC: Braking Coordination, OV: Outside Voltage, LV: Low Voltage [98], [112])

Die Darstellung des Referenzsystems als Graph kann nun ebenfalls erzeugt werden. Die Kantendicke des Graphen wurde mit der Gewichtung der Flusstypen skaliert. Es ergibt sich der Graph in Abbildung 72:

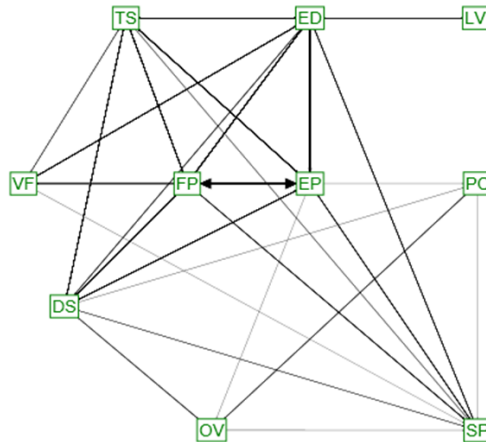


Abbildung 72: Referenzsystems als Graph (Knoten: Subsysteme, Kanten: Signal- und Stoffflüsse) (Mit FP: First Power Source, SP: Second Power Source, ED: Electric Drive, EP: Electric Power, VF: Vehicle Functions, DS: Diagnose, TS: Transmission System, PC: Braking Coordination, OV: Outside Voltage, LV: Low Voltage)

6.4.2 Experimentplan für die Untersuchung der Systempartitionierung

Für die Planung der Clusterungsexperimente wurden vier Verfahrensvarianten unter Variation von vier Faktoren gebildet. Die folgenden Verfahren werden getestet:

- **FOA** (Funktionsorientierte Architektur): Anwendung des Clusteralgorithmus auf die ungewichtete Funktionsmatrix
- **FOAb** (Funktionsorientierte Architektur mit Gewichtung): Anwendung des Clusteralgorithmus auf die ungewichtete Funktionsmatrix unter Verwendung der in 14.3.2 beschriebenen Gewichtung
- **AOA** (Aktivitätsorientierte Architektur): Anwendung des Clusteralgorithmus auf die Abhängigkeitsmatrix zwischen Kontrollfunktionen und Systemaktivitäten $\overline{CNACT}_{n,p}$
- **DSM** (Design Structure Matrix): Anwendung der Sortieralgorithmen nach dem bekannten DSM-Verfahren nach [40]

Folgende Faktoren werden variiert:

- **Clusterzahl** (Zielzahl der Systemmodule, die für den Clusteralgorithmus vorgegeben werden muss)
- **Distanznorm** (Auswahl einer der in 14.3.1 beschriebenen Distanznormen)
- **Seeding-Verfahren** (Parameter für die Bildung der Dendrogramme, die zur Vorauswahl geeigneter Clusterzentren nach 14.3.3 verwendet werden)
- **Funktionsmatrix** (Matrix, auf die die Clusteralgorithmen angewendet werden)

Für den Faktor Funktionsmatrix wurden folgende Ausprägungen untersucht:

- **[Phys|Physikalische Flüsse]**: Clusterung wird durchgeführt mit $\overline{PHYS}_{n,p}$ (Matrix aller Funktionen reduziert auf Energie- und Stoffflussverbindungen)
- **[Cn|Kontrollfluss]**: Clusterung wird durchgeführt mit $\overline{CN}_{n,p}$: Matrix der Kontrollfunktionen
- **[All|Alle Flüsse]**: Clusterung wird durchgeführt unter Verwendung physikalischer Verbindungen und Signalverbindungen
- **[CNACT]**: Clusterung wird durchgeführt mit $\overline{CNACT}_{n,p}$ (Abhängigkeitsmatrix zwischen Kontrollfunktionen und Systemaktivitäten aus der Use-Case-Zerlegung)

Für die systematische Variation aller Ausprägungen aller Faktoren für alle betrachteten Verfahren ergäbe sich theoretisch eine Zahl von ca. 300 möglichen Faktorkombinationen. Daher wurde eine sinnvolle Vorauswahl getroffen. Die nach dieser Auswahl erzeugte Versuchstabelle zeigt Tabelle 9. Für das Design-Structure-Matrix-Verfahren wurde lediglich ein Parameter für die maximale Elementzahl innerhalb eines Clusters variiert.

Faktoren					
Clusterverfahren		Cluster-zahl	Distanznorm	Seeding	Funktionsmatrix
	FOA: Funktions-orientierte Architektur	k = 10; k = 15; k = 20	Jaccard-Distanz; Simple Matching Hamming-Distanz Dice-Distanz	Single Seeding; Average Seeding	Cn: Kontrollfluss; Phys: Physikalische Flüsse; All: Alle Flüsse
	FOAb: Funktions-orientierte Architektur mit Gewichtung	k = 7; k = 10	Jaccard-Distanz; Simple Matching Hamming-Distanz Dice-Distanz	Single Seeding; Average Seeding	Cn: Kontrollfluss
	AOA: Aktivitäts-orientierte Architektur	k = 7; k = 10	Jaccard-Distanz; Simple Matching Hamming-Distanz Dice-Distanz	Single Seeding; Average Seeding	Cn: Kontrollfluss
	DSM: Design Structure Matrix	Parameter: Maximale Clustergröße 100; 50; 20; max. DSM-Größe			Cn: Control Flow; En: Energiefluss; Mt: Materialfluss; Phys: Physikalische Flüsse

Tabelle 9: Versuchsmatrix für die Partitionierungsexperimente

6.4.3 Bewertungsschema für die Partitionierungsexperimente

Wie bereits angesprochen, müssen die Experimente zur Systempartitionierung sowohl hinsichtlich des Funktionsinhalts, als auch hinsichtlich der rechnerischen Ergebnisse zur Modulbildung bewertet werden. Für den Ergebnisgraphen wurden verschiedene Kennzahlen aus der Graphentheorie verwendet. Für jeden Subsystemknoten wurden die folgenden Kennzahlen bestimmt:

- Der Grad des Knoten (eingehend und ausgehend): Dies ist die Anzahl der ein- oder ausgehenden Verbindungen an einem Subsystemknoten [113]
- Clusterkoeffizient: Ein Maß für die Anzahl der vorhandenen Verbindungen im Vergleich mit den maximal möglichen Verbindungen [114]
- Eigenvektor-Zentralität: Ein Maß für die Bedeutung des Subsystemknotens innerhalb des Netzwerks [115]

Für den direkten Ergebnisvergleich wurden Minimum, Maximum und Durchschnittswert der Kennzahlen für die enthaltenen Subsysteme gebildet. Diese Kennzahlen dienen alle der Bewertung der Modularisierung im Hinblick auf die starke Kapselung der Subsysteme mit dem Ziel schlanker Schnittstellen. Die Bewertung des Funktionsinhalts der Module muss nach zusätzlichen technischen oder ökonomischen Kriterien erfolgen.

Nach [52] gibt es drei Prinzipien, die beim Entwurf der Produktarchitektur zur Zielerreichung genutzt werden. Mit diesen Prinzipien lässt sich eine erweiterte Bewertung der Systemarchitektur durchführen. Es muss entschieden werden, wie modular das Produkt aufgebaut wird, der Effekt von Variabilität muss gesteuert werden und die entstehenden Schnittstellen müssen verwaltet werden.

1. Die Modularisierung kann durch Parallelisierung und Kapselung von Informationen den Entwicklungsaufwand verringern und die Entwicklungszeit verkürzen. Wenn die Schnittstellen allerdings zu komplex sind, steigt der Aufwand, da vielfältige Abhängigkeiten zwischen den Subsystemen bestehen. Ebenso können die Modulkosten ansteigen, wenn der Variantenrahmen, der von dem Modul abgedeckt werden soll, zu weit gefasst wird [52].
2. Der Effekt von Variabilität kann in der Systemarchitektur dadurch gesteuert werden, dass hoch variable Anteile isoliert oder zusammengefasst werden. Eine solche Aufteilung kann der Bildung

schlanker Schnittstellen entgegenstehen [52]. Allerdings lässt sich das Risiko im Hinblick auf Schwankungen von Komponentenspezifikationen oder –verfügbarkeiten verringern. In Bezug auf elektrische Antriebssysteme ist beispielsweise der Brennstoffzellenstapel eine Komponente, die prinzipiell starken Schwankungen der Spezifikation unterliegen kann.

3. Die Spezifikation der Schnittstellen muss so ausgeführt werden, dass die Subsystementwicklung nicht unrealistisch eingeschränkt wird. Der Effekt einer Änderung auf alle beteiligten Module muss bekannt und quantifizierbar sein. Dabei müssen geeignete Parameterbereiche festgelegt werden, die Änderungen im Modul tolerieren können [52]. Die Systemarchitektur muss daher auf sinnvolle Schnittstellenparameter überprüft werden.

Die beschriebenen Prinzipien können beispielsweise in einer Entscheidungsanalyse mit multiplen Kriterien qualitativ bewertet werden. Ebenso können zusätzliche Qualitätsattribute aus dem Lastenheft verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird keine detaillierte Auswertung hinsichtlich aller genannten Kriterien durchgeführt. Zu diesem Punkt können in nachfolgenden Arbeiten entsprechende Erweiterungen implementiert werden.

6.4.4 Subsystembildung mit Clusteralgorithmus

Die Ergebnisse der Clusterexperimente mit dem K-Means-Algorithmus wurden nach den beschriebenen Kennzahlen ausgewertet. Zusätzlich wurde das Netzwerk der entstehenden Module visualisiert und ein Package-Diagramm des Funktionsinhalts angelegt. Im Folgenden erfolgt die Darstellung der relevantesten Ergebnisse für die drei Varianten der Modulbildung mit dem K-Means-Algorithmus.

6.4.4.1 FOA: Funktionsorientierte Architektur

Bei der Anwendung des K-Means-Algorithmus ohne Gewichtung brachte die Verwendung der Matrix der Kontrollfunktionen die besten Ergebnisse. Die besten Ergebnisse zeigten die Durchläufe FOA1 und FOA3, deren Auswertung im Folgenden beschrieben wird. Es gilt:

- Es wurde eine Modulanzahl von zehn bis fünfzehn Modulen als Startwert vorgegeben
- Die Berechnung liefert schon nach ca. sechs Sekunden und elf Iterationsschritten ein Endergebnis
- Für die Betrachtung der Matrix der physikalischen Verbindungen steigt die Rechenzeit auf bis zu 140 Sekunden an und liefert zu wenige Funktionsgruppen
- Die Berechnung mit dem Jaccard-Distanzmaß liefert gute Ergebnisse

Die zwei besten Ergebnisse FOA1 und FOA3 sind in Abbildung 73 als Graphen der Subsysteme dargestellt. Anhand dieser Graphen lässt sich der in 6.4.3 beschriebene Kennzahlvergleich durchführen. Dieser wird am Ende der Ergebnisbeschreibung für alle Verfahren vergleichend dargestellt:

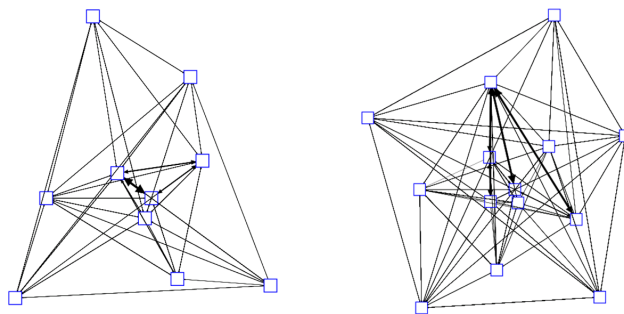


Abbildung 73: Modulnetzwerke aus der Clustering der CON-Matrix (FOA1 und FOA3)

Der mittlere Clusterkoeffizient ist für FOA1 höher. Der Grad der Verknüpfung im Netzwerk ist also höher. Dies ist durch die geringere Modulanzahl erklärbar. Die Eigenvektor-Zentralität, also die Bedeutung des Einzelmoduls im Netzwerk ist entsprechend der stärkeren Integration auch höher.

Zur inhaltlichen Bewertung wurde zu jeder Architekturvariante ein Package-Diagramm erstellt, das die gleichen Funktionsgruppen wie die Referenzarchitektur aus Abbildung 71 darstellt. Dadurch wird ein qualitativer Vergleich möglich. Die Package-Diagramme sind in 16.7 dargestellt. Auffälligkeiten in Bezug auf die inhaltliche Strukturierung der Funktionsgruppen sind die Folgenden:

- FOA1 enthält ein Brennstoffzellen-Modul, welches mit Luft- und Wasserstoffversorgung, Stack und Betankungsüberwachung vollständig ist (positiv)
- Bordnetz-Zwischenkreis ist in FOA1 dem Brennstoffzellensystem zugeordnet
- Kühlsystemfunktionen sind in FOA1 stark verteilt. Abbildung der Wärmeflüsse im Funktionsmodell könnte dies verbessern (negativ)
- Im FOA3 sind durch die höhere Modulanzahl allgemein schlankere Schnittstellen vorhanden.
- Batterie- und Batteriekühlung bilden in FOA3 ein eigenes Modul (positiv)
- Funktionale Gruppierung ist in FOA3 allgemein schärfer, die Modulanzahl ist allerdings zu hoch

Die entstehenden Funktionsarchitekturen sind im Wesentlichen technisch logisch strukturiert, zeigen aber noch einige Abweichungen von der Referenzarchitektur aus Abbildung 71

6.4.4.2 FOAb: Funktionsorientierte Architektur mit Gewichtung

Führt man die in 14.3.2 beschriebene Straffunktion zur Gewichtung des Funktionsnetzwerks ein, ergibt sich eine deutliche Annäherung der Ergebnisse an die Referenzarchitektur aus Abbildung 71. Wie schon bei der ungewichteten Clusterung mit dem K-Means-Algorithmus, brachte die Verwendung der Matrix der Kontrollfunktionen die besten Ergebnisse. Die Durchläufe FOAb1 und FOAb3 zeigten die besten Ergebnisse. Es gilt:

- Es wurde eine Modulanzahl von zehn und sieben Modulen als Startwert vorgegeben
- Die Berechnung liefert schon nach ca. zehn Sekunden und elf Iterationsschritten ein Endergebnis
- Die Berechnung mit dem Jaccard-Distanzmaß liefert gute Ergebnisse

Die zwei besten Ergebnisse FOAb1 und FOAb3 sind in Abbildung 74 als Graphen der Subsysteme dargestellt:

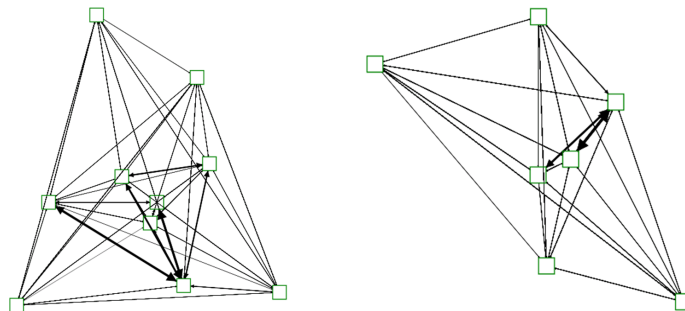


Abbildung 74: Modulnetzwerke aus der gewichteten Clusterung der CON-Matrix (FOAb1 und FOAb3)

Die Kennzahlbewertung zeigt die allgemein stärkere Integration aufgrund der geringeren Modulanzahl. Der Clusterkoeffizient ist ebenso wie die Eigenvektor-Zentralität im Mittel für FOAb1b geringer.

Zur inhaltlichen Bewertung wurden abermals die Funktionsgruppen qualitativ untersucht. Die Package-Diagramme sind in 16.7 dargestellt. Auffälligkeiten in Bezug auf die inhaltliche Strukturierung der Funktionsgruppen sind die Folgenden:

- In FOAb1 sind Funktionen des elektrischen Energiemanagements sind gut gruppiert (positiv)
- In FOAb1 sind Prozessführung und Systeminitialisierung zusammen angeordnet (positiv)
- Prozessführung und Balance-of-plant-Nebenverbraucher sind in FOAb1 nicht klar zugeordnet (negativ)
- Motorinverter wird in FOAb1 nicht beim Motor zugeordnet (negativ)
- FOAb2 (nicht dargestellt) zeigt eine deutliche Gemeinsamkeit mit der Referenzarchitektur
- Brennstoffzellensystem wird in FOAb2 mit Luft-, Brennstoffversorgung, Stackkühlung und Wandler zusammengefasst
- In FOAb2 sind Predrive-Funktionen und Diagnose zusammen angeordnet (positiv)
- Kühlsystemfunktionen werden in FOAb2 als eigenes Subsystem angeordnet

FOAb3 hat deutliche Übereinstimmungen mit der Referenzarchitektur. Subsysteme sind logisch gruppiert. Außerdem sind im Funktionsmodell abgebildete logische Funktionen des Ablaufs (Predrive, Ladeinitialisierung) vom Ablauf her logisch auf Subsysteme verteilt.

6.4.4.3 AOA: Aktivitätsorientierte Gewichtung

Als Vergleichsverfahren zur Clusterung des Funktionsnetzwerks wurde die Clusterung der Abhängigkeitsmatrix zwischen Kontrollfunktionen und Systemaktivitäten $\overline{CNACT}_{n,p}$ direkt gruppiert. Bei diesem Verfahren wurden jedoch trotz der Vorgabe einer höheren Modulzahl nur vier Cluster gebildet, wie in Abbildung 75 dargestellt ist:

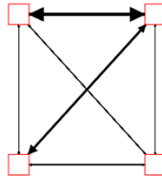


Abbildung 75: Modulnetzwerk aus der gewichteten Clusterung der CONACT-Matrix

Hauptursache für die nur grobe Einteilung ist die sehr einheitliche Matrix. Da die enthaltenen Kontrollfunktionen in fast allen Use-Cases verwendet werden, ist auch die Verbindungsmatrix mit den Systemaktivitäten sehr regelmäßig. Es finden sich daher keine weiteren klar abgegrenzten Gruppen.

Das Package-Diagramm der Funktionsaufteilung ist in 16.7 dargestellt. Folgende Punkte sind interessant:

- Die Strukturierung zeigt eine deutlich stärkere Orientierung an den Use-Cases
- Alle Antriebsfunktionen in einem Subsystem
- Diagnose und Predrive in einem Subsystem
- Alle Funktionen, die für eine Plug-In-Variante des betrachteten Antriebssystems notwendig sind, werden in einem eigenen Modul abgebildet

Diese Art der Clusterung ist als Analysewerkzeug interessant, liefert aber keine wesentlichen, neuen Erkenntnisse. Die Aufteilung könnte in einem Steuergerätenetzwerk ähnlich abgebildet werden, z.B. mit einem eigenen Steuergerät für die Ladeablaufsteuerung, welches unabhängig vom Rest der Funktionalität ist. Damit ist das Ergebnis eine mögliche Eingabe für die technische Architektur zur Verteilung von Funktionen auf Ressourcen.

6.4.5 Subsystembildung mit matrixbasiertem Verfahren

Zum Vergleich des K-Means-Algorithmus mit dem Design-Structure-Matrix Verfahren nach [40] wurde die Matlab-Implementierung aus [116] verwendet. Das DSM-Verfahren sortiert Zeilen- und Spalteneinträge der Funktionsmatrix und bildet Gruppen um die Hauptdiagonale. Dadurch werden Gruppen mit minimaler Interaktion gebildet. Für die Untersuchung mit der Design Structure Matrix zeigte sich:

- Längere Rechenzeiten als K-Means. Für die Kontrollfunktions-Matrix ergibt sich eine Rechenzeit von 20 – 30 s, für die reine Betrachtung der physikalischen Verbindungen ergibt sich ein deutlicher Anstieg auf etwa 10.000 s (ca. 2,8 h)
- Die Modulanzahl muss nicht vorgegeben werden. Es wird lediglich die maximale Funktionszahl pro Cluster definiert. Bei zu großer Vorgabe entsteht eine große Hauptgruppe.
- Auch für das DSM-Verfahren ist die Matrix der Kontrollfunktionen am besten geeignet

Der Algorithmus aus [116] konvergiert zu einer stabilen Lösung. Dies zeigt die Kostenfunktion der Optimierung, die in Abbildung 76 für den Durchlauf DSM3 dargestellt ist:

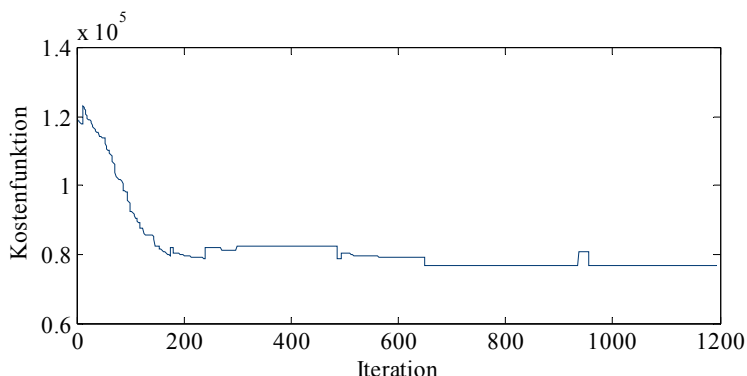


Abbildung 76: Kostenfunktion des DSM-Algorithmus aus [40] für den Durchlauf DSM3

Im Versuch DSM3 wurden die besten Ergebnisse erzielt. Zur Clusterung wurde die Kontrollfunktionsmatrix bearbeitet. Die vorgegebene maximale Elementzahl pro Modul betrug 20 Funktionen und war damit in diesem Durchlauf sehr niedrig gewählt. Abbildung 77 zeigt die Ergebnisdarstellung mit der sortierten Design-Structure-Matrix. Die roten Rahmen sind Markierungen, die der Algorithmus um die erkannten Gruppen legt.

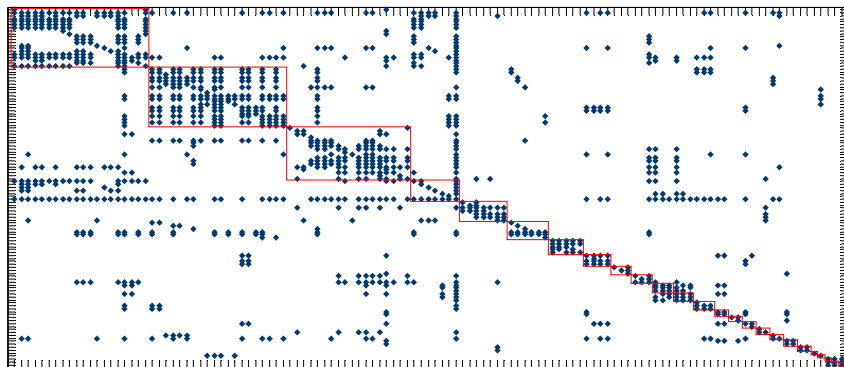


Abbildung 77: Sortierte Kontrollfunktionsmatrix nach Durchlauf des DSM-Algorithmus (DSM3)

Für die dargestellte Clusterung zeigt sich eine relativ homogene Verteilung der Modulgrößen nach kurzer Rechenzeit. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 78 den Durchlauf DSM8 unter Verwendung der Matrix aller Funktionen mit physikalischen Verbindungen. Es wird deutlich, dass die Bearbeitung dieser Matrix keine sinnvollen Ergebnisse liefert. Dieses Ergebnis kommt hauptsächlich durch die verhältnismäßig geringe Anzahl physikalischer Verbindungen zustande.

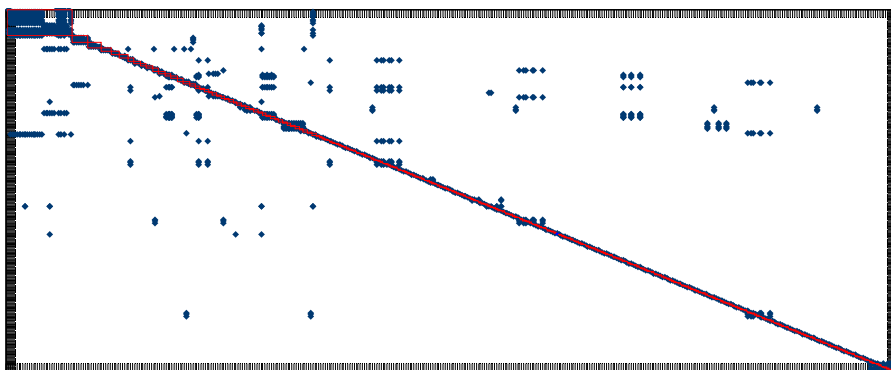


Abbildung 78: Sortierte Funktionsmatrix mit physikalischen Verbindungen nach Durchlauf des DSM-Algorithmus (DSM8)

Die Darstellung der Ergebnismatrix als Modulnetzwerk zeigt Abbildung 79. In dieser Darstellung zeigt sich deutlicher als in der Matrixdarstellung, dass eine Reihe von Modulen mit sehr dünnen Verbindungen an Außenstellen des Graphen angeordnet sind. Bei der Clusterung mit dem K-Means-Algorithmus zeigte sich durchgehend eine höhere Integration der Module.

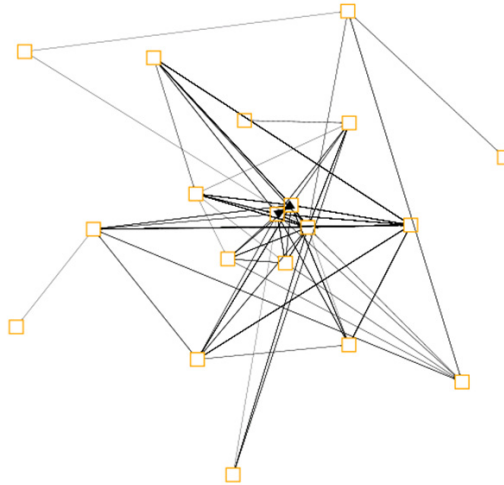


Abbildung 79: Modulnetzwerk aus der DSM-Clusterung der Kontrollfunktionsmatrix (DSM3)

Der Inhalt der Funktionsgruppen wurde auch für das DSM-Verfahren qualitativ untersucht und mit der Referenzarchitektur verglichen. Das Package-Diagramm des Durchlaufs DSM2 ist in 16.7 dargestellt. Für die inhaltliche Struktur gelten folgende Beobachtungen:

- Brennstoffzellenwandler und Tank werden dem Brennstoffzellensystem zugeordnet (positiv)
- Fast alle Kühlsystemfunktionen befinden sich in einem gemeinsamen Modul (positiv)
- Antrieb wird mit Motor, Motorkühlung und Inverter gekapselt (positiv)
- Das Modul mit den Funktionen der elektrischen Energieversorgung enthält nicht die Leistungszusammenführung der Quellen (negativ)

Das bekannte Verfahren der Design-Structure-Matrix ist dann geeignet, wenn die Modulgröße sinnvoll abgeschätzt werden kann. Mit der Kontrollflussmatrix ist eine Elementzahl vorgegeben, die sich mit sinnvollen Rechenzeiten bearbeiten lässt. Die resultierende Modulzahl ist relativ hoch. In den kommenden Abschnitten wird eine Gegenüberstellung mit dem K-Means-Verfahren durchgeführt.

6.4.6 Bewertung der Modularisierung nach Kennzahlen

Die Kennzahlen der nach der Clusterung resultierenden Modulnetzwerke sind für die jeweils besten Ergebnisse der beschriebenen Verfahren in Abbildung 80 dargestellt. Alle Kennzahlen sind als Minimal-, Maximal- und Durchschnittswert dargestellt.

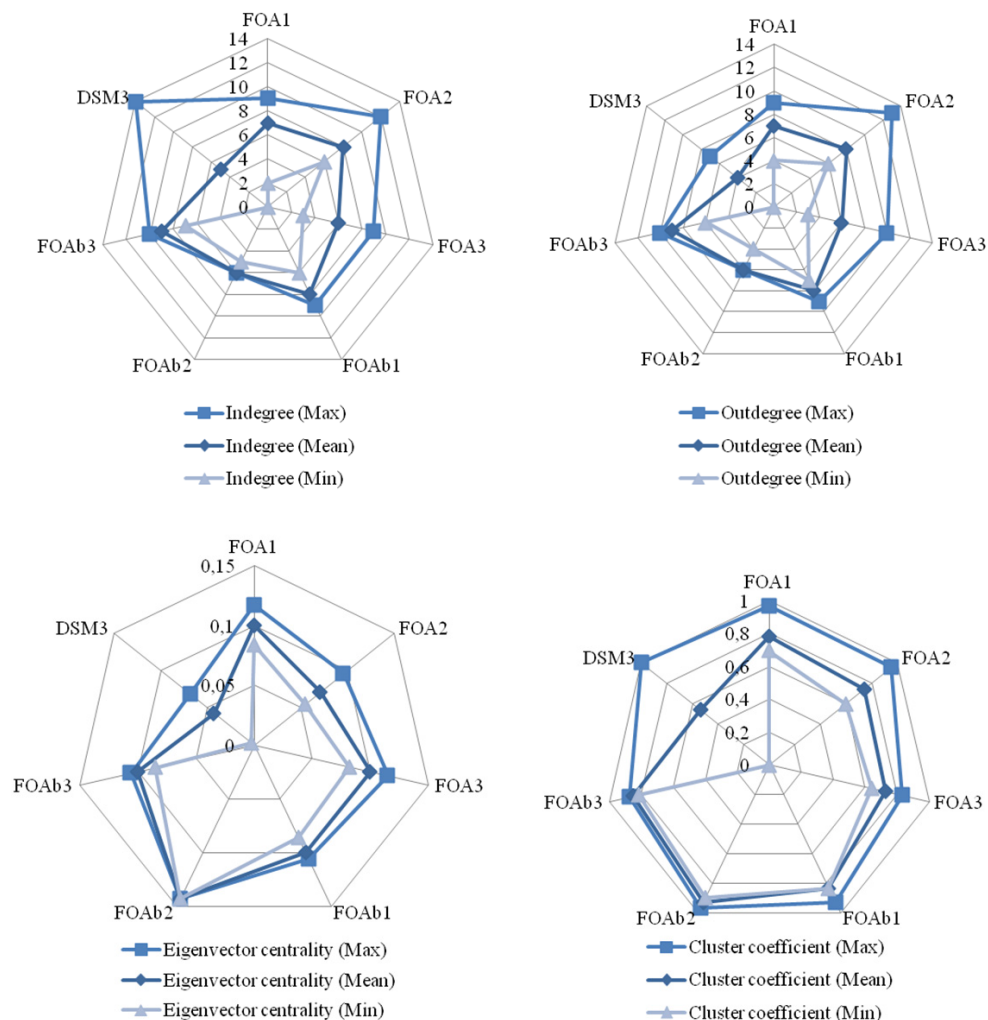


Abbildung 80: Kennzahlvergleich der Clusterexperimente mit der Kontrollfunktionsmatrix

Der Kennzahlvergleich liefert die folgenden Beobachtungen:

- Die Anzahl der eingehenden Kanten (Indegree) und die Anzahl der ausgehenden Kanten (Outdegree) korreliert mit der Anzahl der Module. Ihre Aussagekraft ist daher gering. Hier zeigt sich aber für das DSM-Verfahren eine deutliche Spreizung. Diese ist ein Hinweis für die etwas inhomogenere Clusterbildung mit stark schwankender Größe. Die Clusterung mit dem K-Means-Algorithmus liefert hier bessere Ergebnisse. FOAb1 zeigt eine sehr geringe Spreizung der Kantenzahl pro Modul
- Der Cluster-Koeffizient, ein Maß für den Grad der Verlinkung in einem Graphen, bestätigt die Beobachtung vereinzelter isolierter Knoten für das DSM-Verfahren (Abbildung 79). An dieser Stelle zeigt sich für das gewichtete Clusterverfahren (FOAb) ein homogeneres Ergebnis, als für den Standardalgorithmus (FOA).
- Für die Eigenvektor-Zentralität zeigen sich die höchsten Werte für FOAb2. Die Messung der Zentralität bewertet die Bedeutung eines Knotens innerhalb des Netzwerks. Dabei werden nicht nur die direkten Partner berücksichtigt, sondern auch indirekte Verbindungen zu weiteren Knoten [115]. Die höchsten Werte dieser Kennzahl kann man also so deuten, dass alle Module dieser Gruppierung in ihrem Netzwerk einen hohen Einfluss haben. Also sind überall Elemente hoher

Gewichtung gruppiert und es sind keine isolierten Gruppen mit schwachen Schnittstellen angeordnet, wie bei der DSM-Clustering

Auf der Basis der Kennzahlauswertungen ist das *Clusterverfahren mit dem K-Means-Algorithmus und der Gewichtung der Funktionselemente* am besten geeignet. Die beiden Experimente FOAb1 und FOAb2 werden zur weiteren inhaltlichen Bewertung herangezogen.

Eine weitere Darstellung, die zur Bewertung einer Clustering verwendet wird, ist der Silhouettenplot. Nach [117] zeigt diese Darstellung für jedes Element eines Clusters den Grad der Zugehörigkeit zu dieser Gruppe. Dazu wird zu jedem Element die Distanz zu den Clusternachbarn und zum nächstgelegenen Modul bestimmt. Dabei kommt das gleiche Distanzmaß zum Einsatz, wie bei der Clustering. Die berechnete Kennzahl wird in absteigender Rangfolge als Plot aufgetragen. Bei einer idealen Partitionierung, gäbe es nur positive Werte und gleiche Silhouettenwerte, also rechteckige Anordnungen in der Graphik. Den Silhouettenplot für die Clustering des gewichteten Kontrollfunktionsnetzwerks zeigt Abbildung 81:

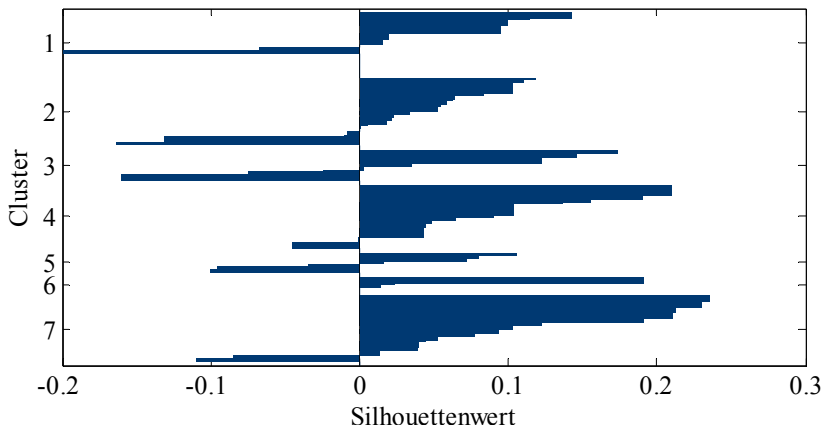


Abbildung 81: Silhouettenplot der Modulaufteilung aus FOAb2 (Sieben Module)

Die Bewertung zeigt eine relativ gute Partitionierung der Funktionselemente. Einige Ausschläge, die auf schlecht zugeordnete Elemente hinweisen, verdeutlichen, dass auf eine zusätzliche qualitative Bewertung nicht verzichtet werden kann. Diese wird im nächsten Abschnitt zusammengefasst.

6.4.7 Bewertung der Modularisierung nach Funktionsinhalt

Die Bildung einer modularen Architektur mit einem Clusteralgorithmus stellt einen Kompromiss dar. Auf der einen Seite steht eine große Funktionsmenge, die zu weiteren Spezifikationszwecken sinnvoll strukturiert werden muss. Dabei sollen im Vorfeld bekannte Anforderungen für die Strukturierung berücksichtigt werden. Auf der anderen Seite darf die resultierende Struktur die Lösungsfindung beim weiteren, technischen Entwurf des Systems nicht zu sehr einschränken. Es darf also auch keine übermäßig detaillierte Funktionsanordnung resultieren.

Die Modularisierung mit dem Clusteralgorithmus ist ein Verfahren, um mit geringem Aufwand eine Strukturierung der Hauptfunktionen und eine Definition der Modulschnittstellen zu erreichen. Strukturanforderungen aus der Systemspezifikation können als Verbindungen in der Funktionszerlegung abgebildet werden. Die Clustering erzeugt schnelle und wiederholbare Ergebnisse für eine Grobstrukturierung, die dann inhaltlich überprüft werden muss. Dadurch wird die Entwurfszeit für die Funktionsarchitektur verkürzt und ein iteratives Entwicklungsverfahren unterstützt. Darüber hinaus ist es möglich mit einem relativ geringen Vorwissen über das System sinnvolle Strukturierungen zu erzeugen.

Die beschriebenen Experimente haben gezeigt, dass das *gewichtete Clusterverfahren die besten Ergebnisse* liefert. Das Verfahren erzeugt die Gewichtung der Funktionen mit der Korrelationsmatrix aus Funktionen und den Aktivitäten aus der Use-Case-Zerlegung. Die Übereinstimmung mit der Referenzarchitektur ist sehr gut. Die Package-Diagramme der Funktionsaufteilung sind als Referenz in 16.7 hinterlegt. Eine Reihe von Unterschieden mit der Referenzarchitektur wird im folgenden Abschnitt erläutert.

6.5 Funktionale Architektur des Antriebssystems

Mit der Bewertung der Clusterungsergebnisse ist der Arbeitsfluss der Funktionssicht nach Abbildung 53 abgeschlossen. Im Anschluss muss lediglich die graphische Modellierung der Funktionsarchitektur realisiert werden, wozu im Rahmen dieser Arbeit die Notation SysML verwendet wird. Die Werkzeugkette aus Abbildung 68 ist damit um die Schritte in Abbildung 82 erweitert. Die Schnittstelle von der Clusterung zur graphischen Modellerstellung wurde jedoch nicht automatisiert. Dieser Schritt kann in nachfolgenden Arbeiten vervollständigt werden.

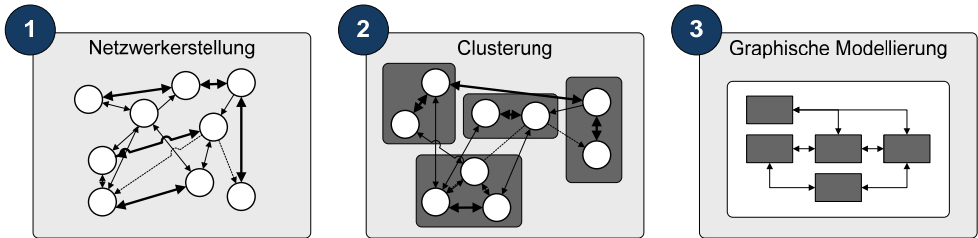


Abbildung 82: Werkzeugkette vom Funktionsnetzwerk bis zum graphischen Architekturmodell

Die für die weitere Bearbeitung verwendete Funktionsarchitektur des elektrischen Antriebssystems ist in Abbildung 83 dargestellt. Für die graphische Modellierung wurden die Funktionsgruppen als SysML-Blockdiagramm dargestellt. Die Namen der Subsysteme sind zu Vergleichszwecken weitgehend identisch mit der Referenzarchitektur. Die Funktionsarchitektur ist bis auf kleine Eingriffe aus den Clusterergebnissen FOAb1 und FOAb2 aufgebaut. Es ergeben sich einige Abweichungen zur Referenzarchitektur, die im Folgenden beschrieben werden.

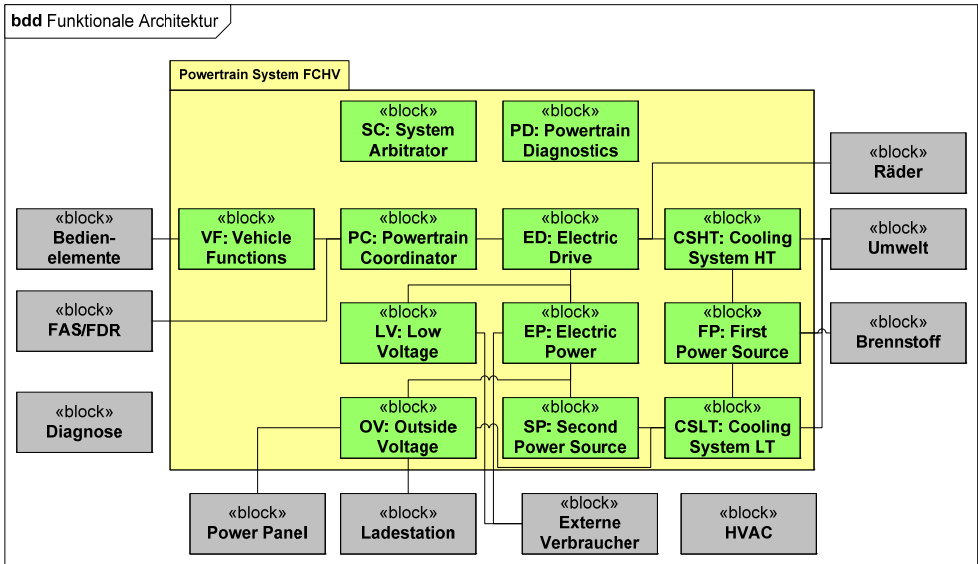


Abbildung 83: Funktionsarchitektur des elektrischen Antriebssystems (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4)

Die Funktionsarchitektur in Abbildung 83 stellt den Betrachtungsrahmen des Antriebssystems als Package-Element dar. Die gebildeten Module (Subsysteme) sind als Blöcke (grün) dargestellt. Kontextelemente (grau), also angeschlossene Systeme oder Komponenten sind außerhalb des Systemrahmens dargestellt. Jedes Modul trägt sogenannte Ports. Diese sind die Schnittstellen, die für die Subsystembeschreibung spezifiziert werden müssen. Die dargestellten Verbindungen zeigen lediglich Stoffflüsse (rot) oder die wesentlichen Datenverbindungen. Detaillierte Beschreibungen der Interfaces sind in den Teilmodellen der jeweiligen Subsysteme dargestellt.

Abweichend von der Referenzarchitektur werden hier die folgenden Subsysteme definiert:

- CSHT Cooling System High Temperature: Hochtemperatur-Kühlkreislauf. Entsprechend dem Clusterungsergebnis ist dieses Subsystem auf der obersten Systemebene angeordnet. In der Referenzarchitektur war eine hierarchische Unterordnung im Brennstoffzellensystem vorgesehen.
- CSLT Cooling System Low Temperature: Niedertemperatur-Kühlkreislauf. Auch dieses Subsystem ist nach dem Clusterungsergebnis auf der obersten Ebene angeordnet.
- SC System Arbitrator: Eine Reihe von koordinierenden Funktionen wurde bei der Clusterung keinem der bekannten Subsysteme zugeordnet. Daher wird hier ein zusätzliches koordinierendes Element definiert, der System-Arbitrierer. Ein solches Modul kann später genutzt werden um steuernde Anteile, z.B. in Form von Zustandsautomaten anzuordnen.

Für jedes der im Anwendungsbeispiel definierten Subsysteme ist ein Blockdiagramm aufgebaut, das alle relevanten Teilmodule und Schnittstellengrößen zeigt. Dieses Diagramm ist die Grundlage für die modellbasierte Spezifikation und für die physikalische Modellierung. Alle Beschreibungen und Spezifikationen können direkt im Modell erfolgen, wodurch zusätzlicher Dokumentationsaufwand vermieden wird. Darüber hinaus sind Änderungsauswirkungen im vernetzten Modell direkt ersichtlich (Impact-Analyse). Dies ist einer der zentralen Vorteile der modellbasierten Entwicklung.

Abbildung 84 zeigt das Blockdiagramm des Subsystems FP First Power Source. In diesem sind laut Referenzarchitektur die Funktionselemente der Hauptenergiequelle des Antriebssystems angeordnet. In dem hier betrachteten Beispiel ist dies das Brennstoffzellensystem.

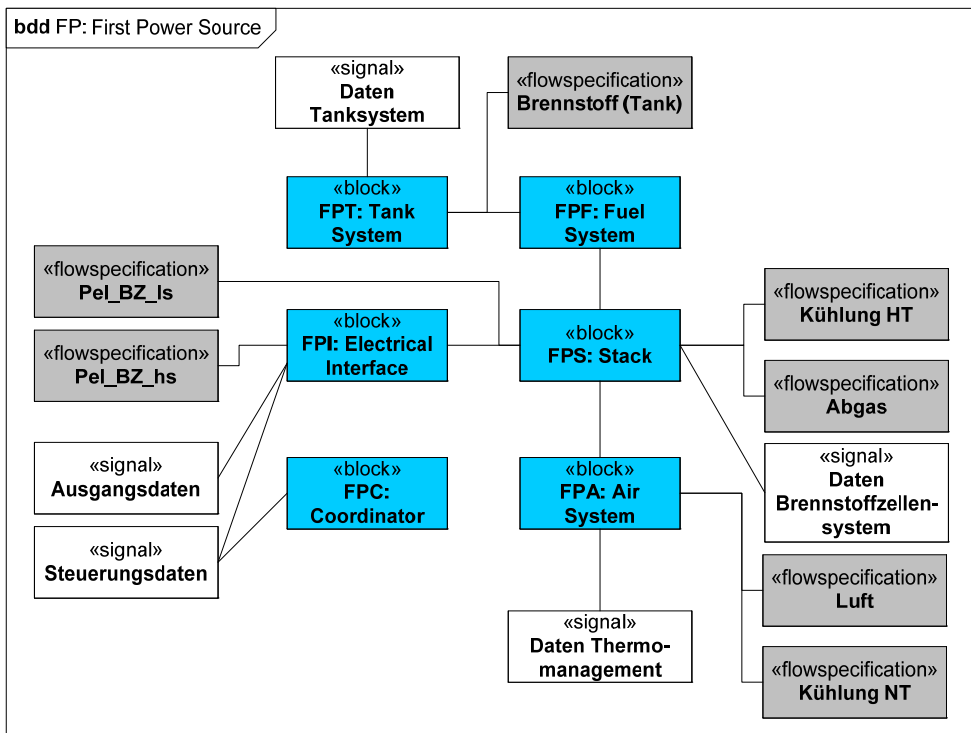


Abbildung 84: Blockdiagramm des Subsystems FP First Power Source (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4)

Für die Modellierung der Teilmodulstruktur wurde keine weitere Clusterung durchgeführt. Die Gliederung ergibt sich aus physikalischen Randbedingungen oder aus den Schnittstellen zwischen den Funktionen. Die Anordnung der Teilmodule in Abbildung 84 entspricht beispielsweise den in 12.2 beschriebenen Grundelementen der Brennstoffzellensysteme. Neben dem Luftsystem und dem Wasserstoffsystem ist der Brennstoffzellenstapel als eigenes Modul definiert. Innerhalb des Subsystems FP (First Power Source) sind außerdem der Tank und eine elektrische Schnittstelle angeordnet. Bei Verwendung einer entsprechenden physikalischen Topologie kann darin ein Spannungswandler angeordnet werden. Ein koordinierendes Element (FPC First Power Coordinator) ist ohne Anbindung an

die restlichen Teilmodule dargestellt. In diesem Teilmodul lassen sich wiederum Funktionsanteile anordnen, die übergeordnet wirken. Dies sind in diesem Fall die Systemkonditionierung, die Vorlaufphasen oder die Betankungssteuerung. Solche Elemente werden später als Zustandsautomaten realisiert und in jedem Subsystem angeordnet, wodurch die Kapselung der Subsysteme erhöht wird. Diese sind damit wartungsfreundlicher und austauschbar.

Neben den Teilmodulen enthalten die Blockdiagramme der einzelnen Subsysteme auch die Blöcke <<flowspecification>> in denen die aus den Funktionsnetzwerken entnommenen Stoff- und Energieströme abgebildet sind sowie die <<signal>> Blöcke, in denen sich alle Signalflusselemente aus der Funktionsvernetzung wiederfinden. Für die Spezifikation des Subsystems ist damit eine vollständige Beschreibung aller Elemente vorhanden. Diese können auf der Basis weiterer Untersuchungen mit numerischen Werten oder genauen Signalbeschreibungen belegt werden.

Abbildung 85 zeigt das Blockdiagramm des Subsystems SP (Second Power Source). In der Funktionszerlegung war die Verwendung eines Energiespeichers zur Rekuperation bereits definiert. Im Subsystem SP lässt sich entsprechend ein Batteriesystem oder Hochleistungskondensatoren (Supercaps) unterbringen.

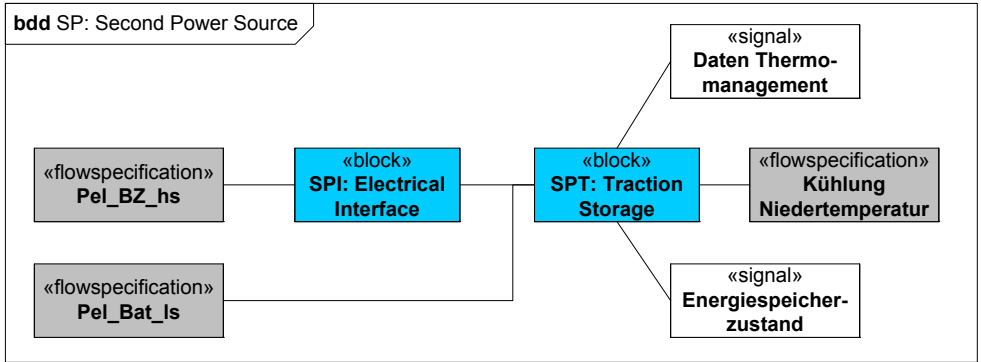


Abbildung 85: Blockdiagramm des Subsystems SP Second Power Source (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4)

Im Subsystem SP sind lediglich zwei Teilmodule enthalten, die mit der Referenzarchitektur nach [112] identisch sind: der Energiespeicher selbst und das elektrische Interface, in dem ein Spannungswandler integriert werden kann.

Die Teilmodulstruktur des Subsystems ED (Electric Drive) zeigt Abbildung 86. Enthalten sind die Teilmodule des Inverters, der bereits in der Clusterung gemeinsam mit der Traktionsmaschine angeordnet wurde. Außerdem sind die Motorkühlung und eventuell Getriebestufen enthalten. Die zentrale Ausgangsgröße für dieses Teilsystem ist das Drehmoment am Rad, so wie es in der Funktionszerlegung modelliert worden war.

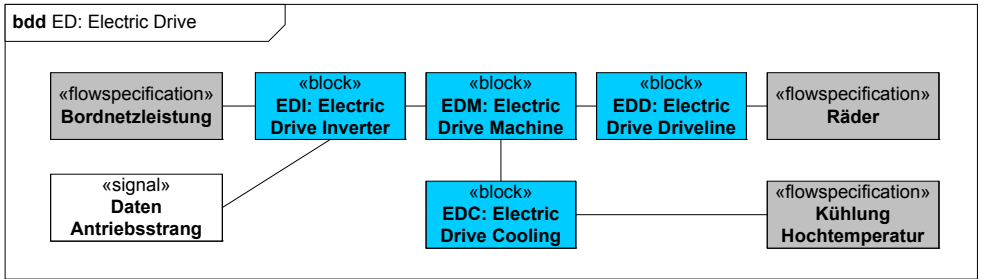


Abbildung 86: Blockdiagramm des Subsystems ED Electric Drive (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4)

Abbildung 87 zeigt das Blockdiagramm für das Subsystem CSHT (Cooling System High Temperature). Es enthält nur ein Teilmodul, das thermische Management selbst. Angeschlossen sind laut der Schnittstellenbeschreibungen der Brennstoffzellenstapel sowie die Traktionsmaschine.

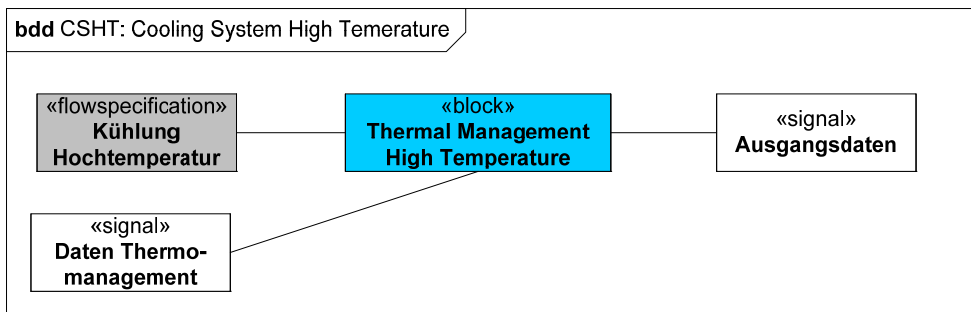


Abbildung 87: Blockdiagramm des Subsystems CSHT Cooling System High Temperature (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4)

Auf weitere Ausführungen zu den einzelnen Subsystemen wird an dieser Stelle verzichtet. Es sollte lediglich dargestellt werden, dass die Funktionsarchitektur vollständig aus der Servicezerlegung des Use-Case-Modells hergeleitet wurde. Diese Herleitbarkeit ist einer der zentralen Vorteile des hier beschriebenen Arbeitsflusses der neuen Systementwicklungsmethodik. Die dazu verwendete Werkzeugkette automatisiert nicht den Entwurf. Sie bietet aber die Möglichkeit mit geringem Aufwand eine schnelle Verarbeitung neuer Informationen durchzuführen.

Der Änderungsaufwand für die Funktionsarchitektur ist nur dann hoch, wenn vollständige neue Use-Cases oder daraus abgeleitete physikalische Services am Start der Verarbeitungskette definiert werden. Solche Änderungen sollen im Regelfall durch die vorher festgelegte Use-Case- und Serviceauswahl vermieden werden. Für alle weiteren Änderungen ergibt sich ein inkrementelles Vorgehen. Alle Teilschritte lassen sich weitgehend automatisiert mit wiederholbaren Ergebnissen durchführen. Dadurch wird ein flüssiger Arbeitsablauf erreicht und die Zykluszeit für die Architekturentwicklung verkürzt.

Der Wert der Architekturdefinition tritt besonders hervor, wenn man die Vorteile des modellbasierten Entwurfs nutzt und auf zusätzliche Dokumentationen verzichtet. Im Modellierungswerkzeug selbst lassen sich numerische Spezifikationen, Design-Entscheidungen und Anforderungen festhalten. Durch die verknüpften Modelle lässt sich für jede Spezifikationsänderung eine Impact-Analyse auf Systemebene durchführen. Die Modelle selbst können in kurzen Entwicklungsabschnitten iterativ verbessert werden.

Die hier abgeleitete Funktionsarchitektur wird im Folgenden als Basis genutzt um die physikalische Beschreibung des elektrischen Antriebssystems aufzubauen und die numerische Spezifikation der Schnittstellengrößen zu erzeugen. Durch die architekturzentrierte Arbeitsweise werden auch dabei Aufwände verringert. Details dazu liefert das folgende Kapitel.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde für das Anwendungsbeispiel des elektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzellen auf der Basis eines Modells der Systemumgebung eine Funktionsanalyse für einzelne Betriebsarten durchgeführt. Für diese Funktionsanalyse wurde ein Vorgehen entworfen, das eine Definition physikalischer Services vorsieht. Diese werden im nächsten Schritt in funktionale Wirkketten aus sogenannten Kontrollfunktionen zerlegt werden. Der neu definierte Funktionstyp der Kontrollfunktion erlaubt eine formale Zerlegung der Services in Funktionen, welche Elemente eines Regelkreises beschreiben. Dadurch wurde eine Menge von 446 voll vernetzten Funktionen identifiziert.

Am resultierenden Funktionsnetzwerk wurde daraufhin die Wirksamkeit einer automatisierten Gruppierung dieser Funktionen zu Subsystemen untersucht. Dazu wurde eine Werkzeugkette aufgebaut, welche die Funktionen basierend auf ihrem Funktionstyp gewichtet und anschließend mit einem „K-Means“-Clusteralgorithmus gruppiert. Zur Bestimmung der am besten geeigneten Lösung wurden verschiedene Interaktionsmatrizen, Gewichtungsschemata und Parameter des ausgewählten K-Means-Algorithmus systematisch variiert. Die resultierenden Funktionsgruppierungen wurden numerisch mit Kennzahlen und qualitativ nach Funktionsinhalt bewertet. Es zeigt sich, dass die betrachtete gewichtete Clustering (FOAb) die besten Ergebnisse liefert. Bei diesem Verfahren wird die Ebene der Kontrollfunktionen betrachtet und mit einem Gewichtungsschema gewichtet, welches Elemente der

Use-Case-Zerlegung (Aktivitäten) verwendet. Dadurch zeigt sich der Nutzen der parallelen Modellierung unterschiedlicher, konsistenter Systemsichten.

Aus der resultierenden Funktionsgruppierung wurde ein graphisches Modell der Funktionsarchitektur in der SysML-Notation aufgebaut. Die Inhalte aller relevanten Subsysteme und ihre Schnittstellen wurden dargestellt. Diese bilden in den folgenden Kapiteln die Grundlage für weitere Entwurfsschritte. Durch die in dieser Arbeit entwickelte Verarbeitungskette wurde eine klare Verbindung von der Anforderungsbeschreibung in Form des Use-Case-Modells bis zur Definition der Funktionen und ihrer Anordnung in der Funktionsarchitektur hergestellt.

7 Physikalische Sicht: Numerische Spezifikation

7.1 Einleitung

Neben der Definition der funktionalen Bestandteile des Systems müssen, gerade bei physikalisch dominierten Systemen wie elektrischen Antrieben mit Brennstoffzellen, numerische Spezifikationen für die einzelnen Systemanteile festgelegt werden. Deshalb ist neben der bereits erläuterten funktionalen Entwurfssicht auch eine physikalische Entwurfssicht unerlässlich, in der die numerischen Spezifikationen für die wichtigsten Systemparameter hergeleitet werden. Diese bilden die Grundlage für den Entwurf der Subsysteme. In diesem Kapitel werden daher die drei zentralen Fragen gestellt, die dabei auftreten:

- Welche Untersuchungen sollen mit dem physikalischen Modell durchgeführt werden?
- Welche Art und Umfang der physikalischen Modellierung ist für die Aufgabenstellung angemessen?
- Lässt sich für die physikalische Modellierung die bereits durchgeführte Funktionsanalyse nutzen?

Basis des physikalischen Simulationsmodells ist die in der bereits beschriebenen Funktionssicht definierte Systemarchitektur. Auf dieser Basis lässt sich durch eine Analyse der jeweiligen Wirkungsketten ein stationäres Modell des Systems ableiten. Die Modellstruktur und damit auch die gesuchten Parameter werden vollständig aus dem SysML-Systemmodell abgeleitet. In der Simulation werden nach der Implementierung Beispielrechnungen für unterschiedliche Standorte (Umweltbedingungen) durchgeführt und alle Parameterbereiche bestimmt.

7.2 Von der Funktionsarchitektur zum Simulationsmodell

Den bei der physikalischen Modellierung befolgten Ablauf zeigt das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 88:

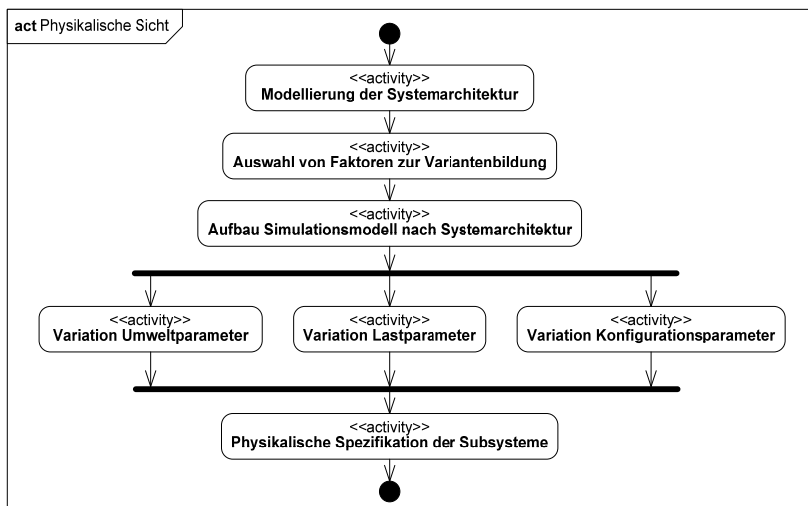


Abbildung 88: Arbeitsfluss der physikalischen Spezifikation der Subsysteme

Auf der Grundlage der in der Funktionssicht identifizierten Systemarchitektur und der entsprechenden physikalischen Schnittstellen gilt es numerische Grenzen für die Schnittstellenparameter zu definieren. Aufbauend auf der in 5 beschriebenen Vorauslegung und den bekannten Lastanforderungen an das Antriebssystem erfolgt auf diesem Weg die Spezifikation der Subsysteme aus der Systemperspektive heraus. Die detaillierte Untersuchung einzelner Realisierungsvarianten für die Subsysteme steht hier nicht im Vordergrund. Diese wird erst nach der Festlegung der Schwankungsbreite der Schnittstellenparameter durchgeführt und ist in anderen Arbeiten beschrieben worden [118], [119], [120], [121]. Die Untersuchung der Parameter-Schwankungsbreite mittels Simulation liefert jedoch die kritischen Zielgrößen für den parallelierten Entwurf der einzelnen Subsysteme.

7.3 Untersuchungsansatz für die numerische Spezifikation

Insbesondere in den Anfangsphasen des Systemdesigns sind sowohl die Leistungsanforderungen als auch die Systemkonfiguration mit Unsicherheiten behaftet. Zusätzlich wirken Umweltparameter auf das System ein, die natürlichen Schwankungen unterworfen sind. Daher muss für die numerische Spezifikation mittels physikalischer Modelle ein Untersuchungsansatz gewählt werden, der in der Lage ist, diese Unsicherheiten zu berücksichtigen.

Hierzu werden verschiedene Szenarien der Kundennutzung als auch der Systemkonfiguration in einer Parametervariation einzelner Betriebspunkte betrachtet. Um die Anzahl der untersuchten Betriebspunkte zu minimieren wird eine statistische Auswahl von Last- und Umweltparametern eingeführt, die als Eingabedaten für das Modell dienen. Die Schwankungsbreiten der Ausgabedaten des Modells werden als numerische Spezifikationen aufgezeichnet. In einer Sensitivitätsanalyse nach [122], wird danach die Wirkung einzeln variiert Modellparameter auf die Schwankungsbreiten der Schnittstellenparameter untersucht.

In einer solchen groß angelegten Parametervariation werden naturgemäß mehrere systeminterne Unsicherheitsquellen aggregiert (Unsicherheit der Systemkonfiguration, der Parameterwerte, der Umweltbedingungen, etc.). Nur mit dieser Kopplung können die unbekannten Unsicherheiten der Zielgrößen an der Systemgrenze aufgezeichnet werden, wie Abbildung 89 schematisch zeigt:

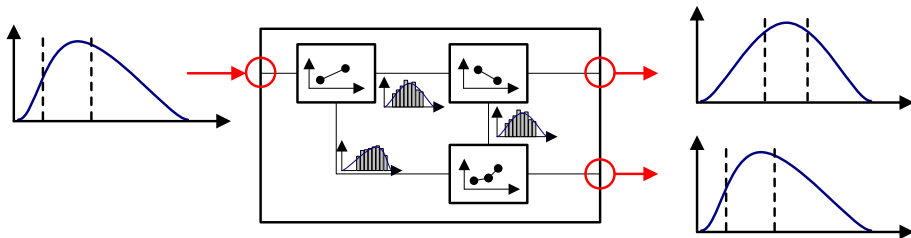


Abbildung 89: Variabilität von Zielgrößen als Resultat verschiedener interner Systemparameter und deren Variabilitäten

Die Aggregation verschiedener Unsicherheitsquellen ist zulässig und sinnvoll, da nach [53] die Gesamtvariabilität als Quadratsumme der Einzelvariabilitäten entsteht. Für die Standardabweichungen gilt Gl. 4:

$$\text{Standardabweichung} \quad \sigma_E = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots} \quad \text{Gl. 17}$$

Mit: σ_E : Standardabweichung der Ergebnisgröße σ_i : Standardabweichung der Parameter

Die Ergebnisunsicherheit wächst demnach nicht so schnell wenn die Unsicherheiten der Eingangsparameter aggregiert werden. Eine höhere Aggregation zu wenigen Parametern reduziert die Standardabweichung der Ergebnisgröße deutlich.

Wenn die Schwankungsbreite der Zielgrößen in Abhängigkeit der systeminternen Parameterwerte und Konfigurationsmöglichkeiten erfasst wurde, lässt sich eine Spezifikation der Schnittstellenparameter festlegen. Diese lässt sich als Funktion der Anforderungsabdeckung durch die gewählten Zielgrößen darstellen. Es können Größen definiert werden, die alle „Worst-Case“-Lastfälle zu hundert Prozent abdecken. Es kann aber ebenso eine Spezifikation für eine Abdeckung zu 98% oder 95% definiert werden. Nach dem Vorbild der kumulativen Verteilungsfunktion werden hier kumulative Abdeckungsfunktionen nach Def. 7 definiert:

Definition: Die kumulative Abdeckungsfunktion stellt die kumulierte Abdeckung von Lastanforderungen als Funktion einer gewählten Parametergröße dar. Dadurch wird dargestellt, welche Parametereinstellung zur Abdeckung eines bestimmten Perzentils der Lastanforderungen eingestellt werden muss.

Def. 7

Abbildung 90 zeigt eine schematische Darstellung einer solchen Funktion:

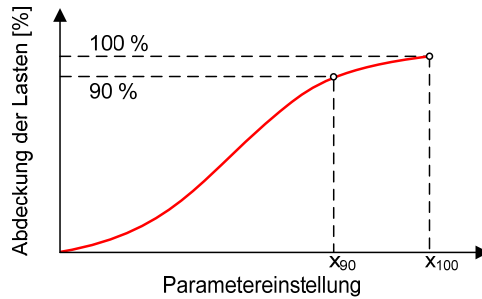


Abbildung 90: Schematische Darstellung einer kumulativen Abdeckungsfunktion

Die Darstellung gibt nach einer Untersuchung bekannter Lastszenarien (z.B. Fahrzyklen) einen Überblick darüber, mit welcher Einstellung eines Parameters ein bestimmter Prozentsatz der Anforderungen abgedeckt werden kann. Die 100 Prozent-Marke entspricht der Parametereinstellung, die notwendig ist, um alle betrachteten Lastanforderungen zu erfüllen. Dabei wird aus Abbildung 90 deutlich, dass eine signifikante Erhöhung des Aufwands notwendig ist, um die Maximalanforderungen zu erfüllen. Auf der Basis solcher Untersuchungen lässt sich bei Bedarf ein System mit reduzierter Leistungsfähigkeit definieren, welches alle regulären Anforderungen abdeckt, jedoch nicht für alle Kombination von „Worst-case“-Fällen geeignet ist. Dieser Ansatz ist in der Softwareentwicklung als „good enough“ verbreitet [123], [124]. In der Systementwicklung tauchen ähnliche Ansätze in der Kostenbewertung auf, wo das Pareto-Prinzip beschrieben wird. Demnach verursachen die oberen 20 % der Anforderungen 80 % der Kosten [125]. Für die Darstellung der Parameterschwankung wird hier eine Boxplot-Darstellung gewählt, die analog zu Abbildung 90 funktioniert. Abbildung 91 zeigt die Schwankungsbreite einer zu spezifizierenden Größe für die Abdeckung von 90, 95 oder 100 % der Lastanforderungen. Nach der Auswahl des Abdeckungsgrads lassen sich damit ein Mittelwert und eine Schwankungsbreite für die Spezifikation angeben.

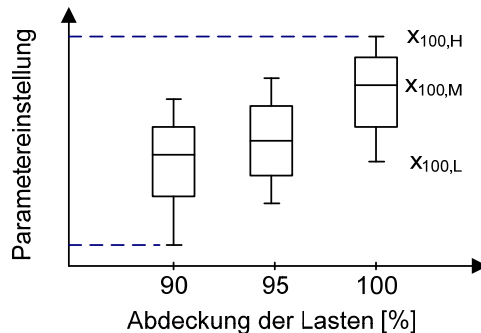


Abbildung 91: Darstellung der Parameterschwankungsbreite für unterschiedliche Anforderungsabdeckungen

Ein nachfolgender Plattformentwurf, der für eine Anzahl verschiedener Fahrzeuge geeignet ist, muss entweder durch eine breite Spezifikation einen ausreichend großen Teil der identifizierten Parameterschwankung abdecken, wodurch Komponenten und Subsysteme vielfältig einsetzbar werden. Oder Systemanteile und Komponenten mit enger Spezifikation müssen geeignet konfigurierbar sein um an andere Systeme anpassbar zu sein. In diesem Fall gilt es eine Komponentenplattform so zu gestalten, dass durch geringe technische Modifikationen eine Anpassungsentwicklung durchgeführt werden kann.

7.4 Vom Systemdesign zur Parameterspezifikation

Das Untersuchungsziel dieses Kapitels entspricht in Teilen dem *"Critical Parameter Management"* der Methodik *"Design for Six Sigma"* (DFSS) [126]. Dabei geht es insbesondere darum, funktionale Einflüsse auf die Zielgrößen zu erkennen und wertmäßig zu erfassen [126]. Abbildung 92 zeigt die Ableitung der Parameterspezifikation ausgehend von den Nutzerbedürfnissen:

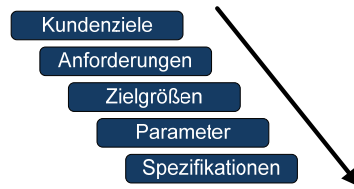


Abbildung 92: Critical Parameter Management Flow Down [126]

Im hier beschriebenen Ansatz sind die Schnittstellenparameter der Kontextmodellierung (4.4) beziehungsweise der Funktionsanalyse (6.2) die Zielgrößen. Die Funktionsanalyse kann analog zur Ableitung in [127] zur Bildung physikalischer Wirkketten verwendet werden. Daraus lässt sich die Struktur für eine erste physikalische Modellierung des Systems ableiten. Die Parameter mit Einfluss auf die Zielgrößen werden dazu identifiziert und hinsichtlich ihrer Schwankungsbreite beschrieben. In einem weiteren Schritt lässt sich in einer Sensitivitätsanalyse untersuchen, welche Parametervariationen den größten Einfluss auf die Schwankungsbreite der Schnittstellenparameter haben. Untersuchungen dieser Art beschreiben beispielsweise [128], [129] und [126]. Zur Bestimmung der Schwankungsbreite der Zielgrößen werden hier zusätzlich Parametereinstellungen für verschiedene Abdeckungsgrade der Lastanforderungen verwendet.

Zur Beschreibung der Einflussparameter auf die Zielgrößen wird in dieser Arbeit der Begriff des Faktors nach [130] verwendet. Die Faktoren lassen sich nach [130] mit unterschiedlichen Faktorstufen belegen, wie in Abbildung 89 angedeutet. Für die hier verwendeten Faktoren gilt Def. 8 nach [130]:

Faktor: Ein Faktor ist eine wesentliche Einflussgröße auf das Ergebnis eines Versuchs. Der Wert des Faktors kann eingestellt und gehalten werden. Störgrößen sind keine Faktoren.

Def. 8

Faktorstufen: Ausgewählte Werte auf die der Faktor festgelegt werden kann. In der hier beschriebenen Untersuchung werden fast ausschließlich zwei Faktorstufen pro Faktor definiert.

Bei dieser Definition wird allerdings nicht berücksichtigt, dass die Faktoren unterschiedlicher Art sein können. Es muss zwischen Parametern zur Auswahl diskreter Systemvarianten und Parametern mit breiterem kontinuierlichem Wertespektrum unterschieden werden. Es wird im Folgenden zwischen drei Parametertypen unterschieden, mit denen drei Typen der Variabilität beschrieben werden. Diese werden hier entsprechend Def. 9 wie folgt festgelegt:

Konfigurationsparameter: Beschreibt eine Variantenauswahl auf System- oder Subsystemebene, also eine Konfiguration des Gesamtsystems. Wird verwendet um die Variabilität der Systemkonfigurationen (Topologien) zu beschreiben.

Lastparameter: Beschreibt eine externe Eingangsgröße. Wird verwendet um die Variabilität der Verwendung zu beschreiben.

Def. 9

Designparameter: Beschreibt eine technische Zustandsgröße des Systems oder einer Komponente. Wird verwendet um die Variabilität der technischen Auslegung zu beschreiben

Für die Modellbildung muss im Vorfeld eine Reihe von Faktoren identifiziert und mit geeigneten Faktorstufen versehen werden. Dies geschieht auf der Basis der in 5 definierten Vorauslegung und den dort beschriebenen Auslegungsschwerpunkten. Damit steht ein Vektor von Inputfaktoren nach [122] fest:

$$\text{Inputfaktoren} \quad \bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k) \quad \text{Gl. 18}$$

Die Ausgangsgrößen, die in Abhängigkeit der gewählten Faktorstufen variieren, sind die Schnittstellenparameter, die spezifiziert werden sollen:

$$\text{Ausgangsgrößen} \quad \bar{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_k) = f(\bar{x}) \quad \text{Gl. 19}$$

Im Gegensatz zu einer Sensitivitätsanalyse werden hier jedoch keine statistischen Verteilungen zur Beschreibung der Unsicherheit der Inputfaktoren verwendet. In der hier vorgestellten Methodik werden nur wenige Faktorstufen variiert. Deren Werte und Schwankungsbreiten stehen bereits aus der Vorauslegung in 5 fest. Es wird also keine Unsicherheit der Eingangsgrößen modelliert oder zufällig aus einer Verteilung gewählt. Vielmehr wird auf der Basis konkreter Faktorstufen die Schwankungsbreite der Ausgangsgrößen berechnet. Die Ergebnisse werden den Eingangsdaten entsprechend aber diskret sein und keine kontinuierlichen Verteilungen der Ausgangsgrößen liefern. Für die Parametervariation lassen sich auf dieser Grundlage die in Abbildung 93 dargestellten Schwerpunkte identifizieren, die auf der Klassifizierung in Def. 9 basieren. Die Aufteilung der Auslegung in Systemdesign und Parameterdesign oder Parameterspezifikation entspricht der Taguchi-Auslegungsphilosophie [131], [132], [133].

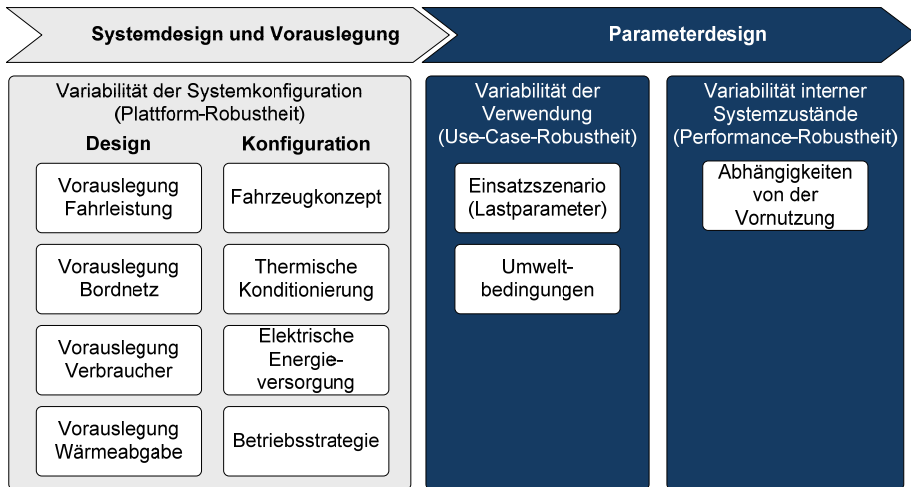


Abbildung 93: Schwerpunkte für die Analyse der drei betrachteten Parametertypen

Als Schwerpunkte der Systemkonfiguration für das Anwendungsbeispiel muss das Hybridisierungskonzept, der Bordnetztyp oder die thermische Konditionierung variiert werden. In den Bereich des Parameterdesigns fallen die Einsatzszenarien aber auch Auswirkungen von Produktionsprozessen, die hier nicht näher betrachtet werden. Interne Systemzustände, die abhängig von der Vornutzung des Fahrzeugs sind, sind beispielsweise Komponententemperaturen oder der Batterieladestand SOC: (State of charge). In der Untersuchung müssen alle Parametertypen variiert werden um Unsicherheiten der Anforderungen oder des definierten Betriebskonzepts explizit zu berücksichtigen. Die Inhalte der Subsysteme selbst werden im Wesentlichen als Black-Box betrachtet. Um das Verhalten des Systems abbilden zu können, ist es jedoch notwendig, einige Systemdetails zumindest in grober Näherung zu modellieren.

Zur Bestimmung des Parameterraums der Schnittstellen werden Simulationsrechnungen durchgeführt, bei denen die Faktorstufen der relevanten Faktoren geeignet kombiniert werden. Dazu wird ein Versuchsplan in Anlehnung an einen Taguchi-Versuchsplan aufgebaut. Bei einem solchen Versuchsplan werden nicht alle Kombinationen von Faktorstufen durchlaufen, sondern nur eine Teilmenge [131]. Nach [133] wird basierend auf der Faktoranzahl und der Anzahl von Faktorstufen eine Matrix erzeugt, die die Experimente mit den jeweiligen Faktorkombinationen angibt. Dazu wird ein inneres Feld mit den Designparametern mit einem äußeren Feld mit Störgrößen kombiniert. Einen solchen Versuchsplan nach [131] zeigt Abbildung 94:

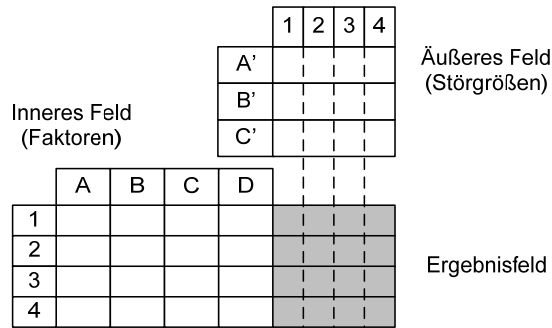


Abbildung 94: Schema eines Taguchi-Versuchsplans mit äußerem Störgrößenfeld [131]

In dem in dieser Arbeit verwendeten Verfahren werden die Lastparameter als Störgrößen definiert und in das äußere Feld geschrieben. Für das innere Feld wird entgegen dem Taguchi-Ansatz eine vollfaktorielle Versuchsmatrix mit allen Kombinationen der Faktorstufen aufgebaut. Daher werden pro Faktor nur zwei relevante Faktorstufen berücksichtigt. Basierend auf den Auslegungsschwerpunkten aus 5.2 wird die folgende Variation durchgeführt (Inneres Feld):

- Fahrzeugleistung (Designparameter: 90 kW und 100 kW)
- Bordnetzspannung (Designparameter: 380 V und 400 V)
- Wandler vor der Brennstoffzelle (Konfigurationsparameter: ja/nein)
- Wandler vor der Batterie (Konfigurationsparameter: ja/nein)
- Brennstoffzellentyp (Konfigurationsparameter: Typ Ballard (Hochdruck)/Typ Nuvera (Niederdruck))
- Betriebsart der Brennstoffzelle (Designparameter: Betrieb bei max Leistung/max. Wirkungsgrad)
- Betriebsbedingungen (Optionaler Lastparameter: Kaltstartbedingungen)

Als äußere Lasten werden folgende Größen definiert (Äußeres Feld):

- Klima: Auswahl des Einsatzgebiets und der dazugehörigen Temperaturverteilungen
- Systemzustand: Abhängigkeit vom gewählten Startzeitpunkt (Systemtemperatur und Batterieladung)
- Streckentyp: Auswahl (Stadt, Landstraße, Autobahn) basierend auf statistischer Verteilung

Damit ergibt sich ein Versuchsplan nach dem in Abbildung 95 dargestellten Muster:

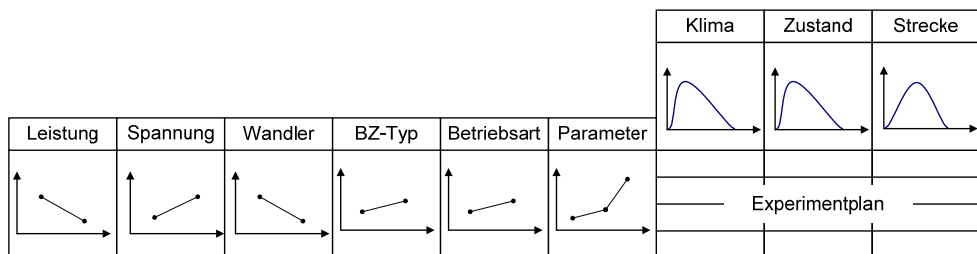


Abbildung 95: Taguchi-Versuchsplan mit Lastparametern als Störgrößen

Das Feld „Parameter“ in Abbildung 95 steht stellvertretend für weitere technische Größen, die innerhalb der Teilmodelle verändert werden können. Die Lastparameter werden aus statistischen Verteilungen ausgewählt, wobei eine frei wählbare Anzahl an Werten per Zufallsauswahl bestimmt wird. Um die Rechenzeit zu begrenzen, sollte die Anzahl der Stichproben nicht zu hoch sein. Durch eine wachsende Anzahl von Stichproben aus der Verteilung wird die Genauigkeit erhöht. Im Gegensatz zu Versuchsplänen nach Abbildung 94 wird jedoch nicht jedes Experiment für alle Stufen der Störgrößenmatrix wiederholt. Dadurch wird der Rechenaufwand gemindert.

Der zentrale Lastparameter in dem hier beschriebenen Modell ist der Betriebspunkt, der über die Bedarfsleistung des Fahrzeugs und die zugehörige Geschwindigkeit vorgegeben wird. Um den erhöhten Leistungsbedarf dynamischer Beschleunigungsphasen zu erfassen werden aufgezeichnete

Leistungsverläufe der Fahrzyklen verwendet, aus denen die Betriebspunkte für das Modell entnommen werden. Mit der Auswahl verschiedener Betriebspunkte, welche die Maximalleistung des Zyklus oder eine geringere Anforderung (90 % oder 75 % der Maximalleistung) darstellen, werden verschiedene Abdeckungsgrade der Bedarfsleistung simuliert.

Vor den Simulationsläufen mit dem physikalischen Modell müssen je nach Anzahl x_{exp} der gewünschten Experimente eine entsprechende Anzahl x_{exp} an Fahrzeugbetriebspunkten und Umweltbedingungen bestimmt werden. Die statistische Auswahl dieser „Lastparameter“ (nach Taguchi-Versuchsplan) wird der Übersichtlichkeit halber hier nicht näher dargestellt. Detaillierte Informationen dazu finden sich in 15.1. Als Ergebnis der Auswahl der Fahrzeugbetriebspunkte steht nach der Datenverarbeitung eine Auswahl von Leistungsspektren fest, die die elektrischen Bedarfsleistungen von statistisch ausgewählten Fahrzyklen enthalten. Abbildung 199 zeigt beispielhaft eine Auswahl von zehn Leistungsspektren, mit Maximal- und Durchschnittsbetriebspunkten.

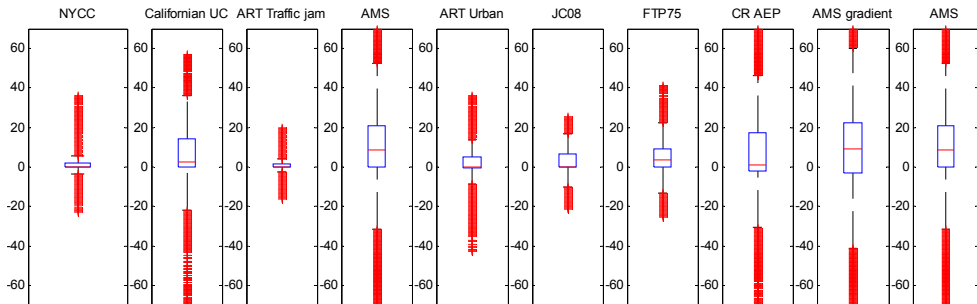


Abbildung 96: Statistisch ausgewählte Zyklen und die Spektren der elektrischen Bedarfsleistung

Neben den Streckendaten werden im Rahmen der Vorverarbeitung auch Umweltparameter ausgewählt. Überall dort, wo im Simulationsmodell Abhängigkeiten von Temperatur, Höhe oder Umgebungfeuchte bestehen, werden diese Parameter wirksam. Daher ist es wichtig, eine sinnvolle Kombination dieser Werte zu wählen. Außerdem soll die Parametrierung häufiger auftretende Szenarien besonders berücksichtigen. Für Modellteile, die eine Temperaturabhängigkeit besitzen, wird daher eine tageszeitabhängige und regionsabhängige Temperatur bestimmt. Dabei wird für hinterlegte Daten verschiedener Klimazonen eine statistische Auswahl durchgeführt, die in 15.2 detailliert beschrieben ist. Ein Beispiel für die zugrundeliegenden Klimadaten zeigt Abbildung 97

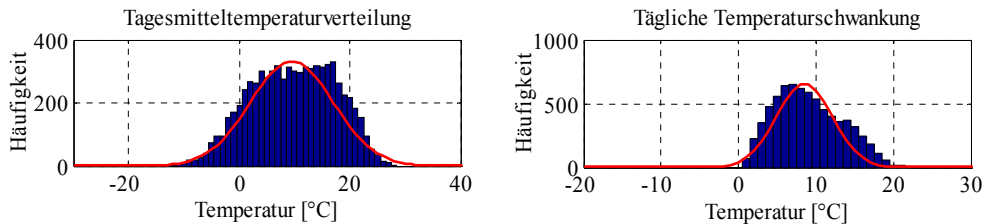


Abbildung 97: Temperaturstatistik für Stuttgart [134]

Am Ende der Vorverarbeitung (Auswahl von Betriebspunkten und Temperaturdaten) wird eine neue Versuchsmatrix aufgebaut, die alle Punkte der vollfaktoriellen Matrix für jeden Temperaturwert und für jeden Lastpunkt der Zykluswahl wiederholt. Damit ergibt sich die Größe der Versuchsmatrix zu:

$$\text{Größe der Versuchsmatrix} \quad n_{VM} = z_{VM} \cdot x_{exp} \cdot x_p \quad \text{Gl. 20}$$

Mit: z_{VM} : Zeilenzahl der Versuchsmatrix x_{exp} : Anzahl gewählter Experimente x_p : Anzahl gewählter Perzentile aus dem Fahrzyklus

Der so erstellte Versuchsplan nach Abbildung 95 ist dennoch kleiner, als er bei einer vollfaktoriellen Variation der Störgrößen im äußeren Feld von Abbildung 95 wäre. Außerdem werden auf diese Art und Weise realistische Szenarien kombiniert und untersucht. Dies ist für die Spezifikation von zentraler Bedeutung.

Nach der Definition des Untersuchungsansatzes wird im Folgenden die Struktur des Simulationsmodells hergeleitet und für die Berechnungen der Parameterschwankungsbreiten verwendet. Dafür wird eine Ableitung aus der SysML-Funktionsmodell durchgeführt und beschrieben.

7.5 Physikalische Modellierung des Antriebssystems

Um die geplante Parametervariation durchzuführen und so eine Spezifikation von Plattformanforderungen für Systemschnittstellen und Subsysteme aufzubauen, wird ein physikalisches Simulationsmodell aufgebaut. Als Grundlage dient die in der Funktionssicht identifizierte Systemarchitektur. Dadurch bleibt die Konsistenz zwischen den verschiedenen Modellsichten erhalten.

7.5.1 Modellierungsansatz

Die physikalische Modellierung des Antriebssystems soll folgende Ergebnisse liefern:

- Festlegung des Entwurfsraums der Subsystemschnittstellen (Identifikation von Plattformanforderungen)
- Sensitivitätsanalyse der Gesamtsystemauslegung für verschiedene Ausprägungen der Designachsen
- Funktionsprototyp auf Basis der Funktionsarchitektur mit der Möglichkeit der späteren Erweiterung zu detaillierterem Simulationsmodell

Dementsprechend wird ein Modell nach folgenden Kriterien aufgebaut:

- Statische Modellierung für die Betrachtung fester Betriebspunkte (Keine Fahrzyklen)
- Einbindung einer Experimentmatrix nach Abbildung 95
- Abbildung der zentralen Komponente (Brennstoffzellenstapel) mittels Kennfeld
- Parameterauswahl des Systems entsprechend den Festlegungen aus der Vorauslegung
- Statistische Auswahl von Systembetriebspunkten aus hinterlegten Verteilungen nach 15.1
- Statistische Auswahl von Umweltparametern aus hinterlegten Verteilungen nach 15.2

Das Modell arbeitet demnach als stationärer Funktionsprototyp, der das Black-Box-Verhalten des realen Antriebssystems abbildet. Die Modellierung erfolgt daher im Wesentlichen auf Basis bekannter physikalischer Gesetzmäßigkeiten und nicht nach bekannten Realisierungsdetails der Komponenten. Eine Ausnahme hiervon bildet in einigen Aspekten der Brennstoffzellenstapel. Dieser ist im Antriebssystem die kritische Komponente, der die Auslegung des Systems wesentlich bestimmt. Daher wird der Brennstoffzellenstapel als datenbasiertes Modell in Form von Kennfeldern abgebildet. Alle weiteren Annahmen und Vereinfachungen werden in der folgenden Modellbeschreibung erläutert.

7.5.2 Modellierung des Brennstoffzellensystems (Subsystem FP)

Als Grundlage der Modellierung dient die bislang identifizierte Funktionsarchitektur. Dazu wird für jedes Subsystem auf der Basis der bekannten Schnittstellen und Funktionsinhalte ein Blockdiagramm des vorläufigen Komponentenlayouts angelegt. Die Grundlage für dieses Layout sind die physikalischen Anteile des Funktionsmodells und die Ergebnisse der Vorauslegung. Die Funktionsträger und die physikalischen Flüsse für das Subsystem FP (First Power Source) zeigt das SysML-Blockdiagramm in Abbildung 98:

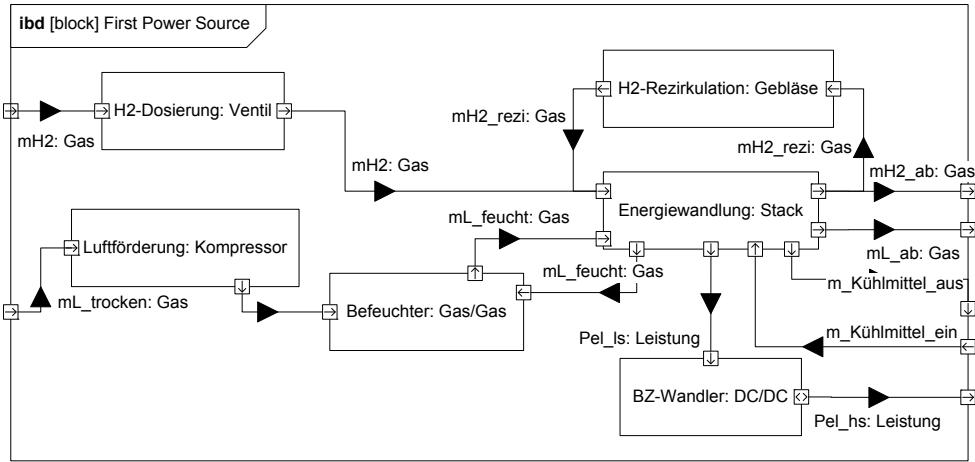


Abbildung 98: Wesentliche Funktionsträger des Subsystems FP (First Power Source)[135], [136]

Die Darstellung als SysML-Diagramm abstrahiert noch Teile der tatsächlichen physikalischen Topologie, bildet aber die wesentlichen Elemente der physikalischen Wirkketten ab. An den Schnittstellen der Elemente lassen sich nun Zustandsparameter identifizieren. Auf dieser Basis werden Darstellungen der physikalischen Teilsystemtopologien und der zu spezifizierenden Größen erstellt. Anschließend wird ein möglichst einfacher Ansatz zur Modellbildung definiert. Ähnliche Ansätze der Modellbildung werden in [137] und [127] beschrieben. Die Modellierung der wesentlichen Elemente wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Für das Subsystem FP (First Power Source) gilt die in Abbildung 99 dargestellte Modellstruktur.

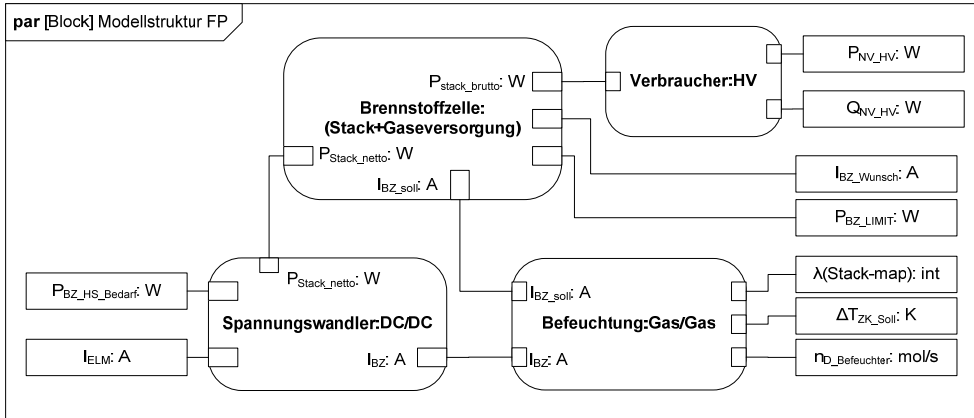


Abbildung 99: Modellstruktur für die Bestimmung der FP-Anforderungen (First Power Source)

Die Modellkomponenten und zugrundeliegende Annahmen und Gleichungen werden im Folgenden beschrieben.

7.5.2.1 Brennstoffzellenstapel

Wie bereits erwähnt ist der Brennstoffzellenstapel die zentrale Komponente des Brennstoffzellensystems. Die Auslegung des gesamten Systems kann daher, wie in [138] dargestellt, quasi um diese Hauptkomponente herum gestaltet werden. Basierend auf der ersten Systemdarstellung aus Abbildung 98 und der geplanten Parametervariation aus 7.4 lässt sich die Modellstruktur definieren. Diese ist in Abbildung 100 als Parameterdiagramm dargestellt.

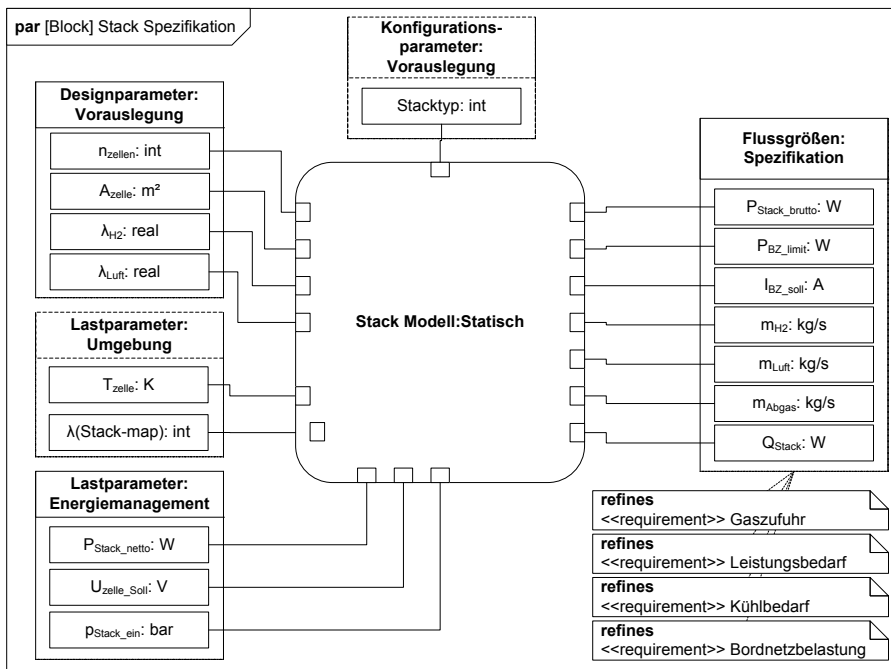


Abbildung 100: Modellstruktur für die Bestimmung der Stack-Anforderungen

Neben den gesuchten Ausgangsgrößen werden in diesem Diagrammtyp (Analyse-Kontext nach [58]) auch die Anforderungsbereiche dargestellt, die mit den Ergebnissen der Analyse iterativ klarer gefasst werden. Die Eingangsgrößen auf der linken Seite von Abbildung 100 sind in die in Def. 9 eingeführten Parametertypen: Konfigurations- Design- und Lastparameter. Wesentliche Designparameter sind die Auswahl der zugeführten Luft- und Wasserstoffüberschüsse, der Druck der zugeführten Luft, sowie die Vorauslegung des Stacks über Zellfläche und Zellzahl. Als Konfigurationsparameter kann der Stacktyp gewählt werden. Lastparameter, bzw. deren Folgegrößen, sind die Zelltemperatur, die Membranfeuchte und die angeforderte elektrische Leistung. Diese werden entsprechend auch im Modell vorgegeben. Zielgrößen sind hier die elektrische Bruttoleistung, welche zur Bereitstellung der geforderten Nettoleistung benötigt wird, sowie Stoff- und Wärmefflüsse und die maximal bereitstellbare elektrische Leistung.

Auf Basis der abgeleiteten Modellstruktur werden physikalische Gleichungen aufgestellt und Modellanteile definiert. Eine Modellbildung des physikalischen Verhaltens des Stapels kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- Datenbasierte Modellierung als Kennfeld [94]
- Näherungsmodelle über eine empirische Nachbildung der Polarisationskennlinie [139], [140]
- Modellierung in elektrischen Analogien [141], [142]
- Detaillierte physikalische Modellbildung [137], [143]

In [144] werden weitere Arten der Modellierung aufgezeigt, insbesondere für die Nachbildung des dynamischen Brennstoffzellenverhaltens. Für die Untersuchung der Spezifikation kann im ersten Schritt ein statisches, nichtlineares Modell verwendet werden. Der Detaillierungsgrad des Modells muss hoch genug sein, um die für die Sensitivitätsanalyse und Parameterspezifikation notwendigen Parametervariationen durchführen zu können. Durch ein mehrdimensionales Kennfeld lässt sich ein physikalisch detailgetreues Abbild des Systemverhaltens erzeugen und gleichzeitig eine schnelle Rechenzeit garantieren. Zur Kennfelderzeugung wird ein detailliertes Simulationsmodell aus [143] verwendet. Dieses Modell wird auch in [93] verwendet. Die Parametrierung ist so angepasst, dass Eckdaten moderner Brennstoffzellen erreicht werden. Konkrete Ziele für die Leistungsfähigkeit liefert beispielsweise [145].

Laut der in 12.2 beschriebenen Grundlagen bestehen wichtige Abhängigkeiten der Stapelleistung vom Betriebsdruck, vom Wasserhaushalt und von der Systemtemperatur. Die Struktur aus Abbildung 100 erlaubt die Modellierung dieser Effekte. Insbesondere die Abhängigkeit der Stapelleistung von der Membranfeuchte soll hier explizit berücksichtigt werden. Sie erlaubt in Kombination mit der Modellierung der Umgebungsbedingungen die Nachbildung realistischer Szenarien, wie Kaltstart oder Betrieb bei sehr trockener Luft. Durch eine Variation von Strom und Temperatur wird eine Kennlinienschar aufgebaut, die weitere Detailuntersuchungen ermöglicht. Außerdem erlaubt das Modell aus [143] eine Variation der Membranfeuchte. Diese ist nach [146] definiert als das Verhältnis aus der Anzahl an Wassermolekülen und der Anzahl an Sulfonsäuregruppen in der Membran. In der Parametervariation für den Brennstoffzellenstapel werden drei Membranfeuchten betrachtet ($\lambda=14$: gute Befeuchtung; $\lambda=10$: mittlere Befeuchtung; $\lambda=6$: schlechte Befeuchtung). Die Kennfelder werden für zwei verschiedene Stapeltypen erzeugt. Für einen Stapel nach dem Vorbild Ballard Mk1100 mit etwas erweiterten Kenndaten [147] und für ein Niederdrucksystem nach dem Vorbild Nuvera Orion [148], [149]. Das Ergebnis für den Ballard-Stack [147] zeigt Abbildung 101:

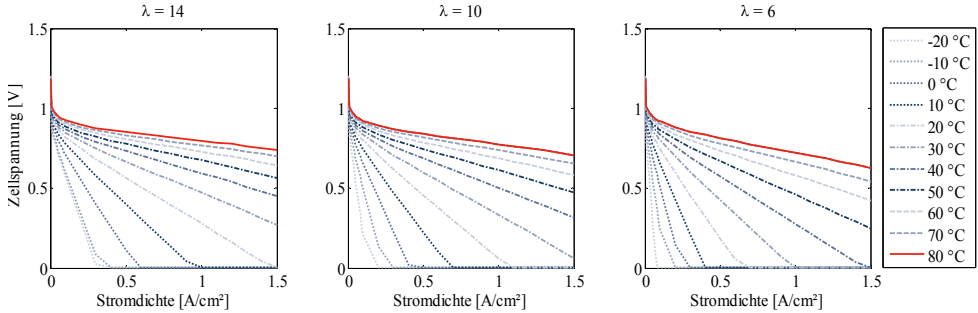


Abbildung 101: Polarisationskennlinien in Abhängigkeit der Temperatur und der Membranfeuchte

Im Modell erfolgt später eine Kennfeldauswahl über die Abschätzung der Membranfeuchte. Diese erfolgt nach dem Zusammenhang aus [146]. Dort wird für die Membranfeuchte der in Gl. 21 dargestellte empirische Zusammenhang in Abhängigkeit der relativen Feuchte für 30 °C hergeleitet:

$$\text{Membranfeuchte} \quad \lambda_{30C} = 0,043 + 17,81\phi - 39,85\phi^2 + 36\phi^3 \quad \text{Gl. 21}$$

Mit: ϕ : Relative Luftfeuchtigkeit

Mit Gl. 21 kann nur eine erste Abschätzung durchgeführt werden. Die Sensitivität der Ergebnisse auf den Kennfeldwechsel ist aber für die Bestimmung des Parameterraums interessant. Die relative Feuchte als Eingangsgröße für Gl. 21 muss entsprechend als Teil der Umweltbedingungen im Modell berechnet werden. Abbildung 102 zeigt eine Darstellung der Kennlinie aus [146]:

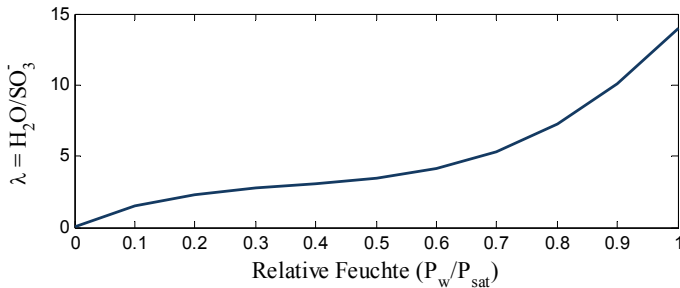


Abbildung 102: Membranfeuchte in Abhängigkeit der relativen Feuchte in gesättigtem Zustand [146]

Neben der Kennfelddarstellung auf Zellebene wird der Brennstoffzellenstapel durch die zwei Kerngrößen der Zellenzahl und der Zellfläche charakterisiert. Die Auswahl von Werten hierfür stellt einen Zielkonflikt dar, zu dessen Auflösung normalerweise Details des Gastransports, der Wärmeabfuhr und der elektrischen Kontaktierung gegenüber gestellt werden [135]. Für die hier betrachtete Modellierung

wird eine einfache Abschätzung vorgegeben. Ähnlich den Darstellungen in [148] wird eine feste Zellfläche definiert. Durch Skalierung über die Zellzahl lassen sich so verschiedene Stapelleistungen realisieren. In der Modellierung wird die Zellzahl mit Gl. 22 über die vorgegebene Zellfläche und das Maximum der Leistungsdichte abgeschätzt.

$$\text{Zellzahl} \quad n_Z = \frac{P_{\text{Stapelbrutto}}}{A_Z \cdot p_{Z_{\text{max}}}} \quad \text{Gl. 22}$$

Mit: $P_{\text{Stapelbrutto}}$: Brutto-Stapelleistung A_Z : Zellfläche
 $p_{Z_{\text{max}}}$: Maximale Leistungsdichte

Die Leistung des Brennstoffzellenstapels ist mit den Ergebnissen der Vorauslegung aus 5.3.1 über den in Gl. 23 dargestellten Zusammenhang bestimmbar:

$$\text{Brutto-Stapelleistung} \quad P_{\text{Stapelbrutto}} = \frac{P_{\text{Stapelnetto}}}{\eta_{\text{sys}}} = \frac{P_{\text{Antrieb}} \cdot (1 - x_{\text{hybrid}})}{\eta_{\text{sys}}} \quad \text{Gl. 23}$$

Mit: $P_{\text{Stapelnetto}}$: Netto-Stapelleistung η_{sys} : Systemwirkungsgrad
 P_{Antrieb} : Antriebsleistung x_{hybrid} : Hybridisierungsgrad

Da noch keine Werte für die Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher vorliegen, wird die Brennstoffzellen-Bruttoleistung über einen angenommenen Systemwirkungsgrad von 0,85 abgeschätzt.

Mit Zellfläche und Zellzahl und den hinterlegten Kennfeldern liegt nun eine präzise, statische Beschreibung des Brennstoffzellenstapels vor, die als Kernelement der physikalischen Modellierung des Systems genutzt werden kann.

7.5.2.2 Luftsystem

Die zur Luftversorgung der Kathode des Brennstoffzellenstapels notwendigen Funktionsträger sind in Abbildung 98 dargestellt. Eine Reduktion auf die Komponenten der Luftversorgung ergibt Abbildung 103. Die Stellen, an denen der Luftstrom bilanziert wird, sind in der SysML-Darstellung als sogenannte „constraint“-Blöcke mit den beschreibenden Parametern dargestellt.

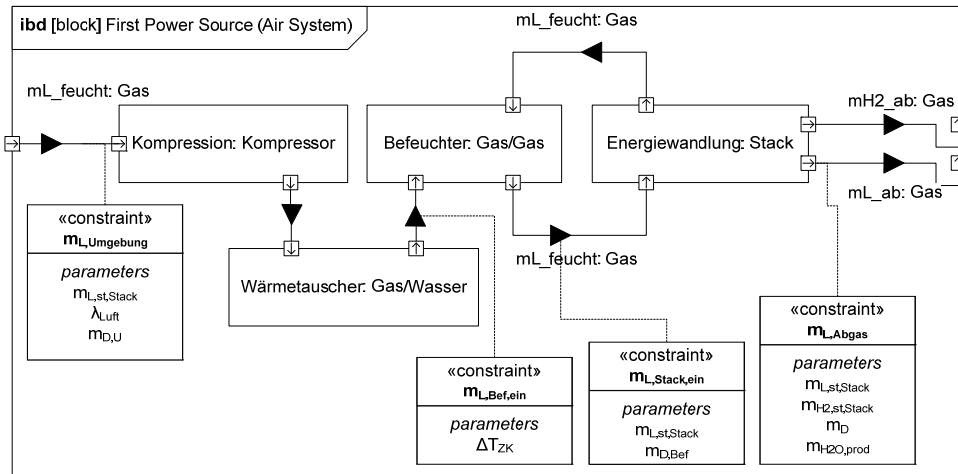


Abbildung 103: Physikalische Topologie der Luftversorgung mit Spezifikationsgrößen

Wesentliche Komponenten sind nach 12.2 die Luftfördereinheit und der Befeuchter. Da im ersten Schritt der Parameterspezifikationen zunächst keine Komponentendetails und auch kein dynamisches Verhalten modelliert werden soll, beschränkt sich die Modellbildung auf die wesentlichen physikalischen Flüsse und deren Zustandsgrößen. Nach Abbildung 98 und Abbildung 103 sind dies der trockene Luftmassenstrom und der zugehörige Luftüberschuss sowie die zuzuführende Feuchtigkeitsmenge im Befeuchter. Dementsprechend kann die elektrische Energieaufnahme des Verdichters

bestimmt werden. Aufgrund der Aufheizung durch die Kompression der Luft und aus Gründen des Wassermanagements muss außerdem eine Zwischenkühlung der Kathodenluft zwischen dem Ausgang der Luftfördereinheit und dem Kathodeneingang vorgesehen werden. Der notwendige Temperaturhub ist an dieser Stelle zu bestimmen. Beispiele für die technische Realisierung des Luftsystems können [150], [151] oder [152] entnommen werden. Für die externen Schnittstellen müssen nach Abbildung 103 die folgenden Schnittstellenparameter der Luftversorgung modelliert werden:

- Massenstrom zugeführter Kathodenluft: \dot{m}_{Luft}
- Massenstrom der abgeführten Gase: \dot{m}_{Abgas}
- Zugeführter Luftüberschuss λ_{Luft}

Der Massenstrom der zugeführten Luft muss wegen der geplanten Szenarienbetrachtungen für verschiedene Klimazonen als feuchtes Gasgemisch berechnet werden. Die Annäherung als trockener Luftmassenstrom ohne Dampfphase führt nach [151] zu einer Abweichung von bis zu 8 % für hohe Lufttemperaturen. Für den stöchiometrisch benötigten Sauerstoffstrom gilt für den Zellstapel nach dem Faraday-Gesetz [136]:

$$\text{Stoffmenge Sauerstoff} \quad \dot{n}_{\text{O}_2, \text{st}, \text{Stapel}} = \frac{I \cdot n_Z}{4 \cdot F \cdot \mu} = \frac{P_{\text{Stapel}} \cdot n_Z}{U_{\text{Stapel}} \cdot 4 \cdot F \cdot \mu} \quad \text{Gl. 24}$$

Mit: I : Strom n_Z : Zellzahl μ : Nutzungsgrad
 U_{Stapel} : Stapelspannung F : Faraday-Konstante P_{Stapel} : Stapelleistung

Der in Gl. 24 eingeführte Nutzungsgrad μ aus [135] berücksichtigt die unvollständige Umsetzung der Reaktionsgase. Der Brennstoffzellenwirkungsgrad lässt sich nach [135] mit Gl. 25 berechnen. Die Erhöhung der Gasmassenströme wird analog bestimmt. Der Nutzungsgrad, mit 0,95 angenommen, wird für die Wasserstoff- und die Sauerstoffstromberechnung verwendet.

$$\text{Wirkungsgrad} \quad \eta_{\text{BZ}} = \mu \cdot \frac{U_{\text{Nenn}}}{U_{\text{th}, \text{max}}} \quad \text{Gl. 25}$$

Mit: U_{Nenn} : Nennspannung $U_{\text{th}, \text{max}}$: Theoretische Spannung μ : Nutzungsgrad

Für die Umrechnung des Stoffmengenstroms des Sauerstoffs in den dazu notwendigen Massenstrom trockener Luft muss das Stoffmengenverhältnis der Luftbestandteile berücksichtigt werden. Mit den Stoffmengenanteilen der primären Luftkomponenten Sauerstoff und Stickstoff und dem zugeführten Luftmassenüberschuss λ_L ergibt sich der Luftmassenstrom für den gesamten Zellstapel nach Gl. 26:

$$\begin{array}{l} \text{Luftmassen-} \\ \text{strom} \\ \text{Zellstapel} \end{array} \quad \dot{m}_{L, \text{Stapel}} = \lambda_L \cdot \dot{m}_{L, \text{st}, \text{Stapel}} = \lambda_L \cdot \dot{n}_{\text{O}_2, \text{st}, \text{Stapel}} \cdot \left(M_{\text{O}_2} + M_{\text{N}_2} \cdot \frac{x_{\text{N}_2}}{x_{\text{O}_2}} \right) \quad \text{Gl. 26}$$

Mit: $\dot{m}_{L, \text{st}, \text{Stapel}}$: Stöchiometrischer Luftmassenstrom λ_L : Luftüberschuss
 $\dot{n}_{\text{O}_2, \text{st}, \text{Stapel}}$: Stöchiometrischer Sauerstoffbedarf M_i/x_i : Molmasse/Stoffmengenanteil

Nach der Bestimmung des Luftmassenstroms können dessen Zustandsgrößen Druck und Temperatur spezifiziert werden. Die Temperaturerhöhung in der Luftfördereinheit kann mit der Gleichung für isentrope Kompression [153] abgeschätzt werden. Die in der Realität etwas höhere Temperaturerhöhung wird durch die Einführung des zusätzlichen Verdichterwirkungsgrads η_v berücksichtigt. Für die Eingangstemperatur des Zwischenkühlers gilt damit Gl. 27:

$$\begin{array}{l} \text{Eingangstemperatur} \\ \text{Zwischenkühler} \end{array} \quad T_{\text{ein}, \text{ZK}} = \frac{1}{\eta_v} \cdot T_U \cdot \left(\frac{p_{\text{ein}, \text{ZK}}}{p_U} \right)^{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)} \quad \text{Gl. 27}$$

Mit: η_v : Verdichterwirkungsgrad T_U : Umgebungstemperatur κ : Isentropenexponent
 $p_{\text{ein}, \text{ZK}}$: ZK-Eingangsdruck p_U : Umgebungsdruck

Daraus ergibt sich direkt der Kühlbedarf der Eingangsluft. Grundlage ist die für den Brennstoffzellenstapel spezifizierte Lufteingangstemperatur [147], [149]. Diese wird in Abhängigkeit des Stroms als

Kennlinie hinterlegt. Es wird hier noch nicht nach Wärmeaustausch im Befeuchter oder in einem Zwischenkühler getrennt.

$$\begin{array}{l} \text{Soll-Temperaturhub} \\ \text{über Zwischenkühler} \end{array} \quad \Delta T_{L,ZK} = T_{\text{ein},ZK} - T_{\text{Stapel,ein}}(I) \quad \text{Gl. 28}$$

Mit: $T_{\text{ein},ZK}$: Eingangstemperatur ZK $T_{\text{Stapel,ein}}$: Soll-Eingangstemperatur Zellstapel

Das Druckverhältnis lässt sich nicht direkt über die Spezifikation des Zellstapels vorgeben. Für den Zellstapel wird ein Druckgefälle über der Zelllänge angegeben, welches ausreichenden Gastransport gewährleisten soll. Entscheidend für die Druckeinstellungen im System sind jedoch das Wasser-Management und die Kühlbedingungen und damit die Absolutwerte des Kathodenluftdrucks. Bei höherem Betriebsdruck sinkt der maximale Wasseranteil in der Luft. Bei gleichem Kathodenluftstrom entweicht weniger Wasser und die Membran trocknet weniger aus. Dadurch lässt sich der Zellstapel aufgrund der besseren Membranbefeuchtung bei höheren Betriebstemperaturen betreiben. Dies ist aufgrund der begrenzten Kühlerflächen im Fahrzeug vorteilhaft. Laut einer Herleitung von [135] rechtfertigen die Vorteile der Druckerhöhung aber meist nicht den Betrieb der energieintensiven Verdichter. Auch eine aktive Wassereinspritzung wie in [152] beschrieben ist aufgrund der Verdampfungsenthalpie sehr energieintensiv. Die Verdampfungsbedingungen verbessern sich hier durch den erhöhten Druck. Für die hier beschriebene Spezifikation werden Druckverhältnisse von $\Pi = (2 \dots 3)$ angenommen. Dies entspricht den Forderungen aus [147] und berücksichtigt weitere Erhöhungen. Die wichtigste Randbedingung im Fahrzeugbetrieb ist der verringerte Umgebungsdruck bei Höhenfahrt. Hieraus ergibt sich bei Höhenfahrt eine untere Druckgrenze, die der Verdichter noch bereitstellen kann. Daher wird die Druckabsenkung bei Höhenfahrt für die Szenarienbetrachtung im Umwelt-Modul erfasst.

Zusätzlich zum trockenen Luftmassenstrom muss nun, wie bereits beschrieben, eine Dampfphase berücksichtigt werden. Dadurch lassen sich die gerade beschriebenen Effekte auch in einem einfachen Modell zur Spezifikation erfassen. Die relative Feuchte ist nach [153] das Verhältnis der absoluten Feuchte zur absoluten Feuchte bei Sättigung. Ausgedrückt als Verhältnis der Partialdrücke gilt das Verhältnis des Dampfdrucks zum Sättigungsdampfdruck:

$$\text{Relative Feuchte} \quad \varphi = \frac{p_D}{p_S} \quad \text{Gl. 29}$$

In einem idealen Gasgemisch verhält sich nach [153] der Partialdruck analog zu Stoffmengenanteilen in einem Stoffgemisch. Es gilt demnach:

$$\begin{array}{l} \text{Analogie von Partialdruck} \\ \text{und Stoffmengenanteil} \end{array} \quad \frac{p_i}{p} = \frac{n_i}{n} \quad \text{Gl. 30}$$

Für den Partialdruck der Dampfphase lässt sich damit ein Ausdruck für die dem System mit der Umgebungsluft zugeführte Dampfmenge formulieren. Mit Gl. 29 ergibt sich die in Gl. 31 dargestellte Beziehung in Abhängigkeit der relativen Feuchte und des Sättigungsdampfdrucks:

$$\begin{array}{l} \text{Bestimmung der zu-} \\ \text{geführten Dampfmenge} \end{array} \quad \frac{n_{D,\text{ein}}}{n_{L,\text{ein}}} = \frac{p_{D,\text{ein}}}{p_{L,\text{ein}}} = \frac{\varphi_{\text{ein}} \cdot p_{S,\text{ein}}}{p_{L,\text{ein}}} \quad \text{Gl. 31}$$

Mit: $n_{D,\text{ein}}$: Stoffmenge Dampf $p_{D,\text{ein}}$: Dampfdruck φ_{ein} : Relative Feuchte
 $n_{L,\text{ein}}$: Stoffmenge Luft $p_{L,\text{ein}}$: Eingangsluftdruck $p_{S,\text{ein}}$: Sättigungsdampfdruck

In der zugeführten Stoffmenge der Luft wird die zusätzliche Dampfphase nach Gl. 32 ebenfalls berücksichtigt:

$$\text{Stoffmenge Luft} \quad \dot{n}_{L,\text{ein}} = \dot{n}_{O_2,\text{ein}} + \dot{n}_{N_2,\text{ein}} + \dot{n}_{D,\text{ein}} \quad \text{Gl. 32}$$

Mit: $\dot{n}_{O_2,\text{ein}}$: Stoffmenge Sauerstoff $\dot{n}_{N_2,\text{ein}}$: Stoffmenge Stickstoff $\dot{n}_{D,\text{ein}}$: Stoffmenge Dampf

Eingesetzt in Gl. 31 ergibt dies:

$$\begin{array}{l} \text{Luftstrom} \\ \text{BZ-Eingang} \end{array} \quad \dot{n}_{L,ein} = \dot{n}_{D,ein} \cdot \frac{p_{L,ein}}{\varphi_{ein} \cdot p_{S,ein}} = \dot{n}_{O_2,ein} + \dot{n}_{N_2,ein} + \dot{n}_{D,ein} \quad \text{Gl. 33}$$

Damit ist die Stoffmenge des zugeführten Dampfes bestimmt:

$$\begin{array}{l} \text{Stoffmenge Dampf} \\ \text{BZ-Eingang} \end{array} \quad \dot{n}_{D,ein} = \frac{\dot{n}_{O_2,ein} \cdot \left(1 + \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}}\right)}{\left(\frac{p_{L,ein}}{\varphi_{ein} \cdot p_{S,ein}} - 1\right)} \quad \text{Gl. 34}$$

Im Modell lässt sich damit der Massenstrom der zugeführten feuchten Luft nach Gl. 35 bestimmen. Der Sattdampfdruck der feuchten Luft wird wie in 12.2.3 beschrieben mit der Antoine Gleichung in Abhängigkeit der Lufttemperatur angenähert. Grundlage für die Berechnung ist die Temperatur des Zellstapels. Damit gilt also die Annahme, dass sich die Kühllufttemperatur sehr schnell der Temperatur des Zellstapels anpasst. Die Simulationen in [151] bestätigen diese Annahme. Damit sind alle Eingangsgrößen für die Berechnung des Massenstroms feuchter Luft nach Gl. 35 bestimmt.

$$\begin{array}{l} \text{Massenstrom} \\ \text{feuchter Luft} \end{array} \quad \dot{m}_{L,feucht} = +\dot{n}_{D,ein} \cdot M_{H_2O} + \dot{n}_{O_2} \cdot M_{O_2} + \dot{n}_{N_2} \cdot M_{N_2} \quad \text{Gl. 35}$$

Zur Beschreibung aller Schnittstellenparameter aus Abbildung 103 muss letztlich noch der Abgasstrom bestimmt werden. Dieser setzt sich aus dem Stickstoffanteil der Luft und dem Produktwasser der Brennstoffzelle zusammen. Hinzu kommen überschüssigen Reaktionsgase aufgrund des überstöchiometrischen Betriebs.

$$\begin{array}{l} \text{Stoff-} \\ \text{menge} \\ \text{Abgas} \end{array} \quad \dot{n}_{Abgas} = (\lambda_{H_2} - 1) \cdot \dot{n}_{H_2,st,ein} + (\lambda_{O_2} - 1) \cdot \dot{n}_{O_2,st,ein} + \dot{n}_{N_2,ein} + \dot{n}_{H_2O,aus} \quad \text{Gl. 36}$$

Die Stoffmenge des ausströmenden Wassers enthält die mit der Außenluft zugeführte Dampfmenge, die durch die Zellreaktion produzierte Wassermenge, sowie die im Befeuchter zugeführte Wassermenge. Es gilt Gl. 37:

$$\begin{array}{l} \text{Stoffmenge Wasser} \end{array} \quad \dot{n}_{H_2O,aus} = +\dot{n}_{D,ein} + \dot{n}_{W,prod} + \dot{n}_{H_2O,Bef} \quad \text{Gl. 37}$$

Die produzierte Wassermenge entspricht nach der Reaktionsgleichung der PEM-Brennstoffzelle der Stoffmenge des zugeführten Wasserstoffs. Mit den dargestellten Gleichungen lassen sich alle beschriebenen Stoffmengenströme des Luftsystems untersuchen und spezifizieren.

7.5.2.3 Wasserstoffsystem

Die Modellierung des benötigten Wasserstoffstroms erfolgt analog zum Luftsystem. Eine typische physikalische Topologie mit den entsprechenden Spezifikationsgrößen ist in Abbildung 104 dargestellt.

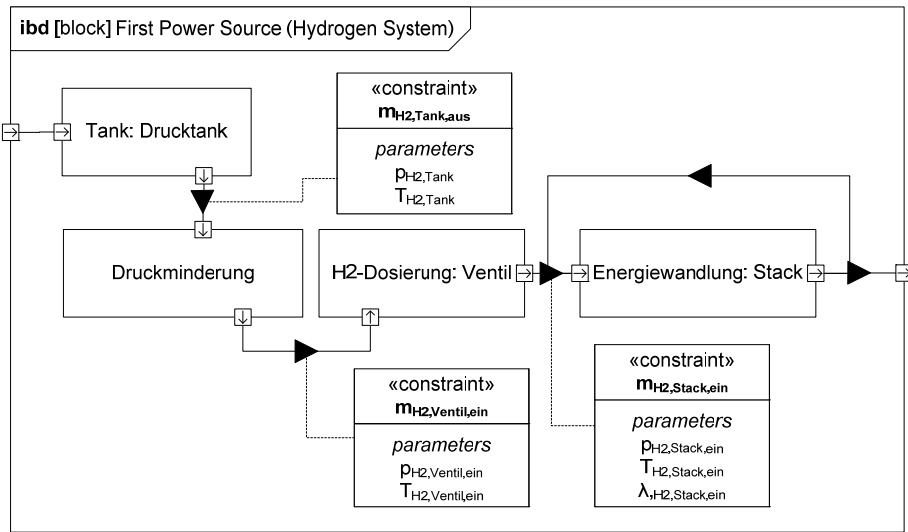


Abbildung 104: Physikalische Topologie der Wasserstoffversorgung mit Spezifikationsgrößen

In der hier beschriebenen Untersuchung ist keine Modellierung des Tanks vorgesehen, da lediglich der benötigte Stoffstrom bestimmt wird. Ebenso sind Details wie ein Purgeventil oder ein Kondensatabscheider noch nicht berücksichtigt, da diese keinen Einfluss auf die Schwankungsbreite der physikalischen Flussparameter haben. Der benötigte Wasserstoffüberschuss wird der Spezifikation des Brennstoffzellenstapels entnommen [147], [149]. Für den Entwurf des Wasserstoffsystems müssten alle Druckniveaus festgelegt werden. Entscheidend ist insbesondere der Ventileingangsdruck, der über den vollen Druckbereich des Tanks in einem engen Fenster gehalten werden muss. Aus dem zulässigen Betriebsdruck des Zellstapels und dem Eingangsdruck des Tanks lassen sich die Druckverhältnisse über dem Ventil und über dem Druckminderer festlegen. An der hier betrachteten externen Systemgrenze wird jedoch zunächst nur die externe Betankungsschnittstelle beschrieben. Dazu gehören das geforderte Druckniveau des Tanks, das in der Vorauslegung auf 700 bar festgelegt wurde, und die Massenströme von zugeführtem und abgeführtem Wasserstoff. Der Rezirkulationsstrom wird hier nicht spezifiziert. Für die stöchiometrisch benötigte Wasserstoffmenge gilt Gl. 38:

$$\text{Stoffmenge Wasserstoff} \quad \dot{n}_{H_2, st, Stapel} = \frac{I \cdot n_Z}{2 \cdot F \cdot \mu} = \frac{P_{St} \cdot n_Z}{U_{St} \cdot 2 \cdot F \cdot \mu} \quad \text{Gl. 38}$$

Daraus lässt sich analog zum Luftsystem der zuzuführende Wasserstoffmassenstrom bestimmen:

$$\text{Wasserstoffmassenstrom Zellstapel} \quad \dot{m}_{H_2, Stapel} = \lambda_{H_2} \cdot \dot{n}_{H_2, st, Stapel} = \lambda_{H_2} \cdot \dot{n}_{H_2, st, Stapel} \cdot M_{H_2} \quad \text{Gl. 39}$$

Eine Befeuchtung der Wasserstoffseite ist für die hier betrachteten Topologievarianten nicht vorgesehen [118].

7.5.2.4 Elektrische Schnittstelle

Entsprechend der in 2.8 dargestellten Strukturen elektrischer Antriebsstränge kann die Anbindung des Brennstoffzellensystems direkt oder über einen Hochsetzsteller erfolgen. Um die Auswirkungen beider Varianten in der Analyse des Parameterraums zu berücksichtigen, wird der Wandler im Modell zuschaltbar ausgeführt. Die Modellstruktur zur Bestimmung der relevanten Spezifikationsgrößen ist in Abbildung 105 dargestellt. Die Brennstoffzellenseite als Eingang des Wandlers wird hier als Low Side (LS) bezeichnet, der Ausgang auf der Bordnetzseite entsprechend als High Side (HS).

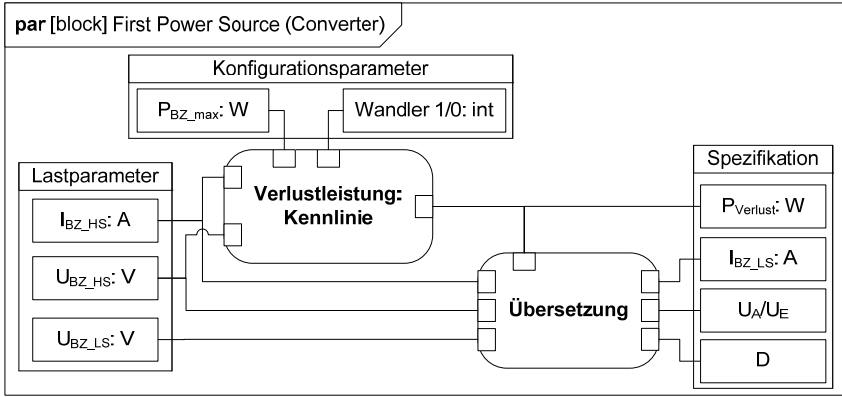


Abbildung 105: Modellstruktur für die Bestimmung der Wandleranforderungen (First Power Source)

Zur Modellierung wird aus der Eingangsleistung auf der Bordnetzseite und einer vorgegebenen Brennstoffzellenspannung ein Strom berechnet. Der Wandler selbst wird über eine einfache Verlustleistungskennlinie abgebildet. Der Modellblock zur Bestimmung der Verlustleistung ist über zwei Konfigurationsparameter einstellbar. Mit der maximalen Brennstoffzellenleistung wird die Verlustleistung nach Gl. 40 geschätzt:

$$\text{Verlustleistung des DC/DC-Wandlers} \quad P_{V,DCDC} = f\left(\frac{P_{ein}}{P_{max,BZ}}\right) \quad \text{Gl. 40}$$

Für die Eingangsleistung (Low Side LS) des Wandlers gilt der Zusammenhang in Gl. 41:

$$\text{Eingangsleistung des DC/DC-Wandlers} \quad P_{HS} + P_{V,DCDC} = P_{LS} \quad \text{Gl. 41}$$

Mit diesen Zusammenhängen lässt sich nun aus den geforderten Ausgängenlasten ein entsprechender Sollstrom für die Brennstoffzelle bestimmen. Die dazugehörige Spannung wird von der Betriebsstrategie vorgegeben.

$$\text{Sollstrom des Brennstoffzellenstapels} \quad I_{BZ,LS} = \frac{P_{LS}}{U_{BZ,LS}} = \frac{P_{HS} + P_{V,DCDC}}{U_{BZ,LS}} = \frac{U_{HS} \cdot I_{HS} + P_{V,DCDC}}{U_{BZ,LS}} \quad \text{Gl. 42}$$

Zusätzlich zu den Strömen und der entstehenden Verlustleistung lassen sich mit den in 13.1.4 beschriebenen Zusammenhängen das Übersetzungsverhältnis des Wandlers und der zugehörige Aussteuergrad (**D**: Duty cycle) angeben. Damit sind alle in Abbildung 105 hergeleiteten Spezifikationsgrößen beschrieben. Für den Fall der Berechnung ohne Verwendung eines Wandlers wird die Verlustleistung zu null gesetzt. Dadurch ist die Bordnetzspannung gleich der Brennstoffzellenspannung. Im Modell wird eine Konfigurationsvariable genutzt um den Wandler als Teil der Faktoriervariation ein- oder abzuschalten.

7.5.2.1 Nebenverbraucher

Zum Betrieb des Brennstoffzellensystems ist, wie in 12.2 beschrieben eine Reihe von Zusatzkomponenten (BoP: Balance of Plant) notwendig. Da diese Komponenten einen nennenswerten Energiebedarf haben, senken sie den Systemwirkungsgrad und erhöhen die benötigte Bruttoleistung des Zellstapels. In der Systemauslegung muss dieser Zusatzbedarf daher für die Dimensionierung des Zellstapels und für die Spezifikation des Kühlsystems berücksichtigt werden. Die Komponenten, deren Energiebedarf und Wärmeabgabe im Modell berücksichtigt werden sind:

- Luftfördereinheit
- Wasserstoffzirkulationsgebläse
- Verlustleistung der DC/DC-Wandlers
- Kühlmittelpumpe

Zur Bestimmung der Bedarfsleistung für die Luftverdichtung, muss im Modell eine Kopplung mit dem Strom der Brennstoffzelle berücksichtigt werden. Abbildung 106 zeigt die Berechnungsstruktur für die Verdichterleistung und die entsprechende Bruttoleistung des Brennstoffzellensystems:

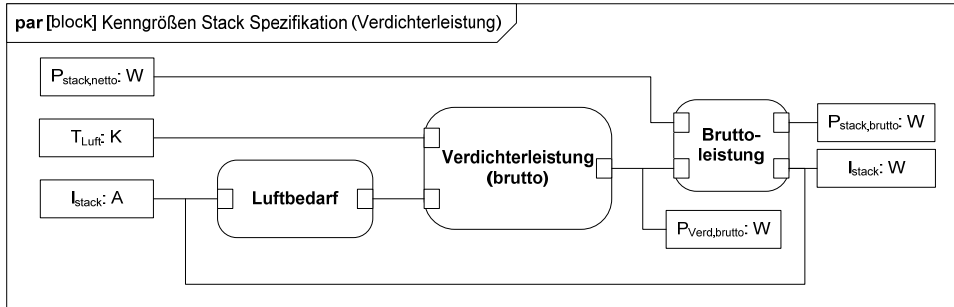


Abbildung 106: Modellstruktur zur Bestimmung des Leistungsbedarfs des Verdichters (First Power Source)

Der Berechnung werden die Bedarfsnettoleistung, der Brennstoffzellenstrom und die Lufttemperatur zugeführt. Nach Berechnung des Luftmassenstroms nach Gl. 26 kann die notwendige Verdichterleistung nach Gl. 43 bestimmt werden:

$$\text{Verdichterleistung} \quad P_{Verd,brutto} = \frac{\dot{m}_L \cdot c_p \cdot T_L}{\eta_{is} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{mech}} \cdot \left(\Pi^{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right)} - 1 \right) \quad \text{Gl. 43}$$

Die Bedarfsleistung des Brennstoffzellensystems erhöht sich um diesen Betrag. Damit ändert sich bei vorgegebener Brennstoffzellenspannung der Strom, den der Wandler stellen muss. In Abbildung 106 ist der Brennstoffzellenstrom damit als Ausgang der Bruttoleistungsberechnung und als Eingang der Luftbedarfsberechnung dargestellt. Dieser Kreisschluss kann iterativ berechnet oder geschätzt werden. Brennstoffzellenstrom und Bruttoleistung sind zentrale Größen der Spezifikation, die in der Simulation aufgezeichnet werden.

Für das Wasserstoffrezirkulationsgebläse wird eine einfache lineare Kennlinie hinterlegt, die abhängig vom Strom eine Bedarfsleistung ausgibt. Die Hauptkühlmittelpumpe kann als konstanter Nebenverbraucher abgebildet werden. Die wesentlichen Verbraucher, die zur Abschätzung des Leistungsbedarfs benötigt werden, sind damit über einfache Abschätzungen abgebildet. Für die Spezifikation der Schwankungsbreite von Parametern ist eine höhere Modelldetaillierung an dieser Stelle nicht sinnvoll. Mögliche Erweiterungen werden beispielsweise in [137] oder [93] beschrieben

7.5.2.2 Wärmelast

Um die aus dem Subsystem FP entstehenden Wärmelasten für das Kühlsystem abzuschätzen und erste Aussagen über notwendigen Kühlmittel- und Kühlluftstrom tätigen zu können, werden einfache Wirkungsgradabschätzungen verwendet. Die angenommene Randbedingung ist eine vollständige Abfuhr der entstehenden Verlustwärme im Kühlmittel. Diese Annahme stellt den oberen Grenzfall dar, da im Realsystem auch durch Strahlung oder Konvektion Wärme in benachbarte Systembereiche abgegeben wird. Im Subsystem FP werden vier Wärmelasten modelliert:

- Das Brennstoffzellensystem mit der abzuführenden Reaktionswärme
- Die Verlustwärme des Spannungswandlers
- Die Verlustwärme des Rezirkulationsgebläses
- Die Verlustwärme der Luftfördereinheit

Alle Wärmelasten werden über einfache Wirkungsgradbeziehungen abgeschätzt. Für das Brennstoffzellensystem wird der Wirkungsgrad nach Gl. 25 berechnet. Für den Spannungsabfall gilt damit:

$$\text{Spannungsverlust} \quad U_V = \left(1 - \frac{\mu \cdot U_{BZ}}{U_{th,max}} \right) \cdot U_{BZ} \quad \text{Gl. 44}$$

Mit: μ : Nutzungsgrad U_{BZ} : Brennstoffzellenspannung $U_{th,max}$: Theoretische Spannung

Die Verlustleistung des Brennstoffzellenstapels lässt sich demnach wie folgt abschätzen:

$$\text{Verlustleistung Zellstapel} \quad P_{V,\text{Stapel}} = U_V \cdot I_{LS} \cdot n_z \quad \text{Gl. 45}$$

Mit: U_V : Spannungsverlust I_{LS} : Strom Brennstoffzelle n_z : Zellzahl

Im Modell sind diese Gleichungen in der in Abbildung 107 gezeigten Struktur aufgebaut.

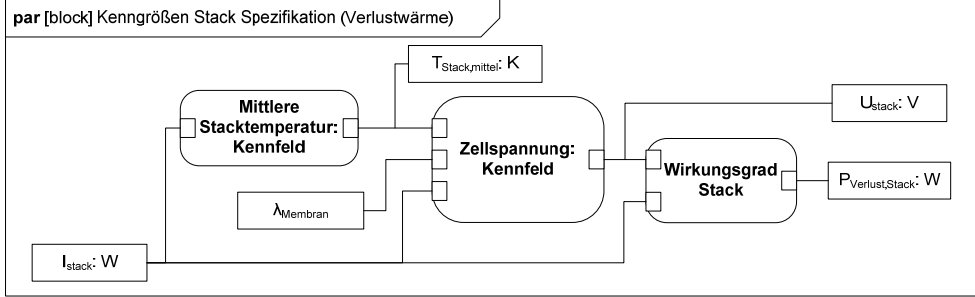


Abbildung 107: Modellstruktur für die Bestimmung der Stack-Verlustleistung (First Power Source)

Die mittlere Stacktemperatur wird über ein stromabhängiges Kennfeld aus [147] abgeschätzt. Durch Wechsel dieses Kennfelds ist es möglich auch Kaltstartbedingungen abzubilden. Zusammen mit der Membranfeuchte λ kann aus den in 7.5.2.1 beschriebenen Kennfeldern die Zellspannung bestimmt werden. Die Verlustleistung wird im Anschluss nach Gl. 45 berechnet.

Für den Spannungswandler wird die Verlustleistung nach Gl. 40 vollständig als Wärmeverlust angenommen. Für das Rezirkulationsgebläse wird ein konstanter Wirkungsgrad angenommen. Mit einer geschätzten Leistungskennlinie ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$\text{Verlustleistung Rezirkulationsgebläse} \quad P_{V,HRB} = (1 - \eta_{HRB}) \cdot P_{HRB} \quad \text{mit: } P_{HRB} = f(P_{BZ}) \quad \text{Gl. 46}$$

Mit: η_{HRB} : Wirkungsgrad Rezirkulationsgebläse P_{HRB} : Leistung Rezirkulationsgebläse P_{BZ} : Leistung Brennstoffzelle

Die Verlustleistung des Verdichters kann über konstante Wirkungsgrade und die zuvor in Gl. 43 berechnete Verdichterleistung bestimmt werden. Es gilt Gl. 47:

$$\text{Verlustleistung Verdichter} \quad P_{V,\text{Verdichter}} = (1 - \eta_{is} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{mech}) \cdot P_{\text{Verd,brutto}} \quad \text{Gl. 47}$$

η_{is} : Isentropen-wirkungsgrad η_{el} : Elektrischer Wirkungsgrad η_{mech} : Mechanischer Wirkungsgrad $P_{\text{Verd,brutto}}$: Verdichter-leistung

Für das Brennstoffzellensystem wird nach [120] ein Zweikreiskühlsystem angenommen. Der Brennstoffzellenstapel und das Rezirkulationsgebläse werden dem Hochtemperaturkreislauf zugeordnet. Die Verlustleistungen von Kompressor und Spannungswandler werden über den Niedertemperaturkreislauf abgeführt. Damit ist eine vollständige Abschätzung der Wärmelasten abgebildet, die der Kühlsystemspezifikation zugeführt werden kann.

7.5.3 Modellierung der Umwelteinflüsse der Modelleingangsgrößen

In direktem Zusammenhang mit den Eingangsgrößen des Modells des Brennstoffzellensystems steht die Modellierung der relevanten Umwelteinflüsse. Dabei müssen Zustandsgrößen des zugeführten Luftmassenstroms entsprechend der zuvor gewählten Umweltdaten berechnet werden. Dies ist notwendig, um die angestrebten Szenarioanalysen unter Verwendung der statistisch ausgewählten Lastpunkte durchführen zu können. Die benötigten Zustandsgrößen ergeben sich aus den Modelleingängen für das Brennstoffzellensystem in Abbildung 103 und den Gleichungen für die relevanten Größen des Luftsystems Gl. 29, Gl. 31 und Gl. 33. Die resultierende Modellstruktur mit den relevanten Ausgangsgrößen zeigt Abbildung 108:

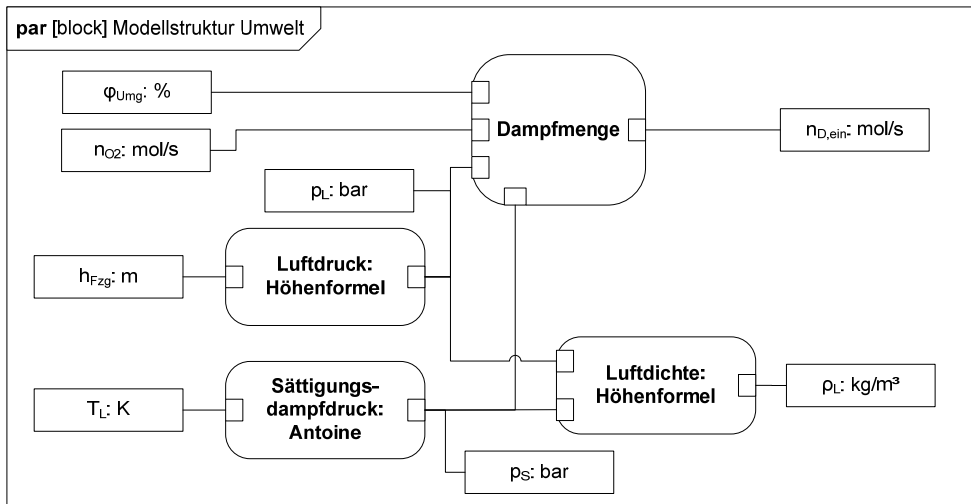


Abbildung 108: Modellstruktur für die Bestimmung der Zustandsdaten der Eingangsluft

Zentrales Element ist die Berechnung der dem Brennstoffzellensystem zugeführten Dampfmenge. Diese wird nach der bereits gezeigten Gl. 34 berechnet. Der dazu benötigte Sättigungsdampfdruck, wird wie in 12.2.3 dargestellt mit der Antoine-Beziehung gebildet. Als Eingangstemperatur dient die statistisch ausgewählte Umgebungslufttemperatur auf Basis der ausgewählten Geodaten.

Der Einfluss der Höhe wird in der Berechnung des Luftdrucks mit der barometrischen Höhenformel nach [154] berücksichtigt. Darin wird die Höhenangabe der ausgewählten Geodaten verwendet:

$$\text{Luftdruck} \quad p(h) = 101325 \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \cdot h}{288,15}\right)^{5,255} \quad \text{Gl. 48}$$

Die Bestimmung der Luftdichte erfolgt mit dem idealen Gasgesetz nach Gl. 49:

$$\text{Luftdichte} \quad \rho(h) = \frac{p(h)}{R \cdot T_u} \quad \text{Gl. 49}$$

Durch die so bestimmten Zustandsgrößen der Umgebung können die Einflüsse der ausgewählten Geodaten im Modell berücksichtigt werden.

7.5.4 Modellierung des Batteriesystems (Subsystem SP)

Die Funktionsträger und Spezifikationsgrößen des Batteriesystems zeigt Abbildung 109. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um den Batteriepack, den Spannungswandler und einen Kühlkreislauf.

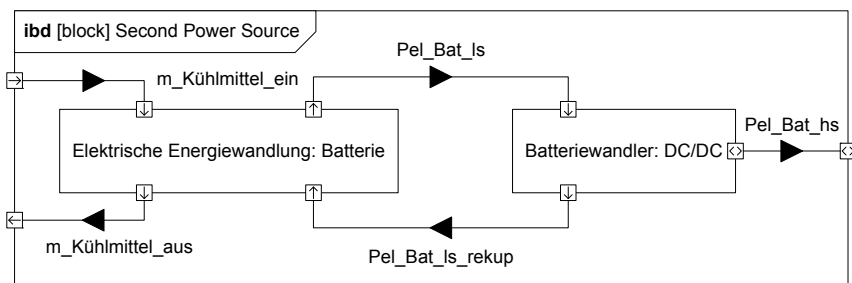


Abbildung 109: Wesentliche Funktionsträger des Subsystems SP

Wie schon beim Brennstoffzellensystem ist die Verwendung eines Spannungswandlers abhängig von der gewählten Topologie. Im Modell ist diese Konfigurationsmöglichkeit abgebildet. Die Modellstruktur, die sich aus den gesuchten Spezifikationsgrößen ergibt ist in Abbildung 110 dargestellt:

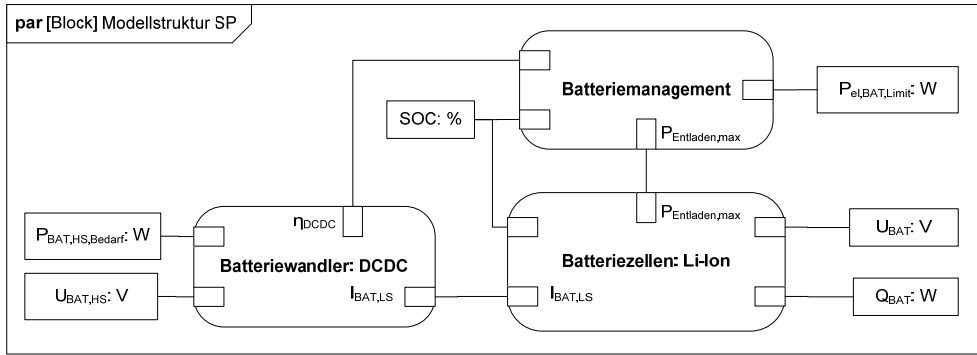


Abbildung 110: Modellstruktur für die Bestimmung der SP-Anforderungen (Second Power Source)

Das Modell des Spannungswandlers ist analog zu der Realisierung in 7.5.2.4. Daneben liegen ein Modell der Batteriezellen und ein Block der Funktionen des Batteriemanagements abildet.

Zur Spezifikation der Schnittstellengrößen wird kein vollständiges Batteriemanagement modelliert. Es wird lediglich eine Berechnung der maximalen Entladeleistung implementiert. Diese Größe ist für das zentrale Energiemanagement von Bedeutung, da diese Grenzen maßgeblich für die Leistungsaufteilung auf die beiden Quellen sind. Die Berechnung der Entladeleistung erfolgt aus den drei in Abbildung 110 dargestellten Eingangsgrößen gemäß Gl. 50:

$$\text{Entladegrenze Batteriesystem} \quad P_{el,BAT,Limit} = P_{Entladen,max} \cdot \eta_{DCDC} \cdot L(SOC) \quad \text{Gl. 50}$$

Mit: $P_{Entladen,max}$: Maximale Entladeleistung Zelle η_{DCDC} : Wirkungsgrad DC/DC-Wandler $L(SOC)$: Straffunktion

Die Strafffunktion $L(SOC)$ ist eine einfache Kennlinie, die bei zu niedrigen Ladeständen die Entladeleistung auf sehr kleine Werte begrenzt.

7.5.4.1 Batteriezellen

Der zweite im Subsystem SP (Second Power Source) realisierte Modellteil ist die Abbildung der Batteriezellen selbst. Die Zielgrößen der Spezifikation und alle weiteren abgeleiteten Parametrierungen zeigt Abbildung 111:

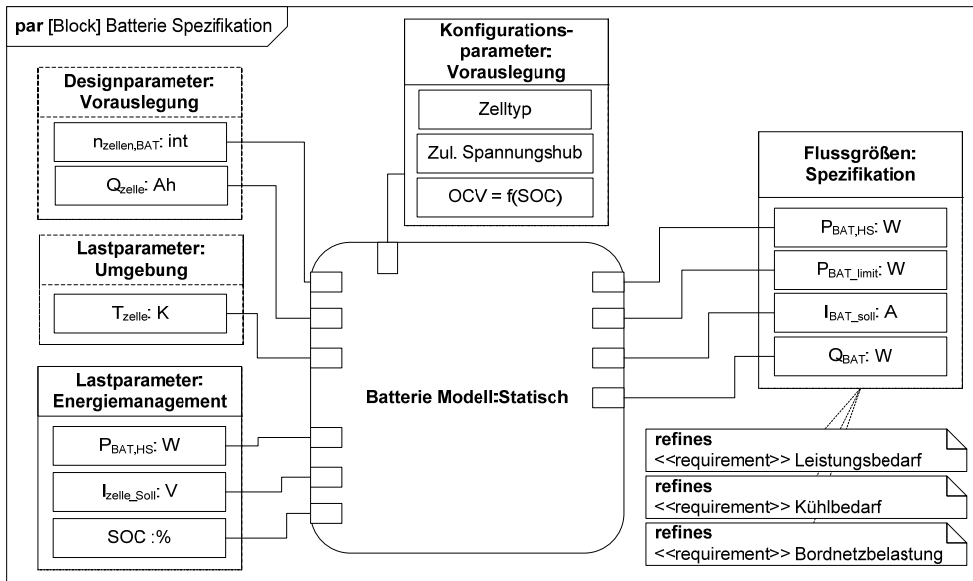


Abbildung 111: Modellstruktur für die Bestimmung der Batterieanforderungen

Für die Abbildung der Batteriezellen sind die drei als Konfigurationsparameter dargestellten Größen entscheidend.

- Als Zelltyp werden gemäß der Vorauslegung Li-Ionen-Zellen mit 20 Ah Kapazität aus [101] betrachtet
- Der zulässige Spannungshub der Batteriezellen bestimmt die maximale Entladeleistung. Die minimal zulässige Klemmenspannung wird entsprechend für normale Entladung oder kurzzeitige Schnellentladung festgelegt
- Die Kennlinie der offenen Zellspannung $OCV=f(SOC)$ in Abhängigkeit des Ladestands ist eine entscheidende Beschreibung des Zellverhaltens. Hier gelten Abschätzungen aus [101] und [93]

Die Parameter des Energiemanagements werden durchgehend berechnet. Für die Zelltemperatur wird eine konstante Temperatur von 30 °C angenommen. Eine genauere Modellierung ist in dieser Untersuchung nicht notwendig. Es gilt die Annahme, dass die Batterie in einem stabilen Temperaturbereich betrieben wird. Zur Realisierung der in Abbildung 111 hergeleiteten Struktur des Zellmodells werden Kennlinien nach einem elektrischen Ersatzschaltbild verwendet. Basierend auf dem damit berechneten Innenwiderstand wird die maximal mögliche Entladeleistung der Batteriezellen bestimmt. Das elektrische Ersatzschaltbild für die Lithium-Ionen-Zelle gemäß [155] zeigt Abbildung 112

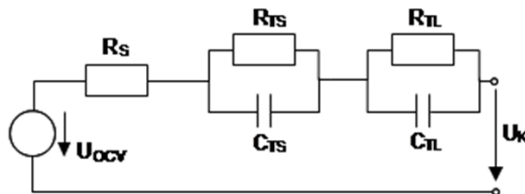


Abbildung 112: Elektrisches Ersatzschaltbild einer Lithium-Ionen-Zelle (S: Serieller Widerstand; TS: RC-Glied mit kurzer Zeitkonstante; TL: RC-Glied mit langer Zeitkonstante) [155]

Im Modell wird ein Kennfeld der offenen Zellspannung hinterlegt. Diese Spannung reduziert sich um einen Spannungsabfall am ohmschen Widerstandsanteil und um den Spannungsabfall an zwei RC-Gliedern. Die dazu benötigten Kennlinien sind aus [93] und [101] entnommen. Da das Modell nur statische Betriebspunkte simuliert, entsteht ein etwas zu geringer Gesamtwiderstand, da die dynamisch reagierenden RC-Glieder im statischen Betrieb unterbewertet werden. Diese Ungenauigkeit wird hier

aber zugunsten der einfachen Modellstruktur in Kauf genommen. Das Batteriemodell liefert damit die aktuelle Zellspannung und den Innenwiderstand der Zellen.

Im zweiten Modellblock des Batteriemodells wird die maximale Entladeleistung bestimmt. Mit der zuvor bestimmten Zellspannung und dem Innenwiderstand der Zellen gilt Gl. 51:

$$\text{Maximale Entladeleistung} \quad P_{\text{Entladen,max}} = \frac{U_{\text{OCV}} - U_{\text{KL,min}}}{R_{i,\text{ges}}} \cdot U_{\text{KL,min}} \quad \text{Gl. 51}$$

Mit: U_{OCV} : Offene Zellspannung $U_{\text{KL,min}}$: Minimale Klemmenspannung $R_{i,\text{ges}}$: Innenwiderstand Batteriepack

Die so definierte maximale Entladeleistung geht in die bereits in Gl. 50 dargestellte Berechnung der Leistungsgrenze ein, die an das Energiemanagement übergeben wird. Die untere Klemmenspannung wird im Modell auf 2,88 oder 2,83 gesetzt. Dadurch wird berücksichtigt, dass das Batteriesystem kurzzeitig bei einer höheren Entladeleistung betrieben werden kann. Dadurch kann ebenso eine technische Entwicklung hin zu höheren erlaubten Spannungsspreizungen der Zellen berücksichtigt werden.

7.5.4.2 Wärmelast

Die aufgrund von Abwärme entstehende Wärmelast, die vom Kühlsystem aufgenommen werden muss, wird für das Batteriepack über den Innenwiderstand und die damit anfallende Verlustleistung abgeschätzt. Es gilt:

$$\text{Verlustleistung Batteriepack} \quad P_{V,BAT} = R_{i,\text{ges}} \cdot I_{BAT}^2 \quad \text{Gl. 52}$$

Mit: $R_{i,\text{ges}}$: Anteile Innenwiderstand I_{BAT} : Batteriestrom

Aufgrund des hohen Wirkungsgrads der Batteriezellen ist die entstehende Wärmelast gering. Im Antriebssystem ist das Batteriesystem dem Niedertemperaturkühlkreislauf zugeordnet [120].

7.5.5 Modellierung der Antriebskette (Subsystem ED)

Zur Modellierung der Antriebskette von der Traktionsmaschine bis zur Momentenumsetzung am Rad wird ein einfaches Kennfeld verwendet. Da die elektrische Bedarfsleistung und das Drehmoment als Lastpunkte vorgegeben werden, muss nur das Wirkungsgradkennfeld der Traktionsmaschine hinterlegt werden, um die Verlustleistung abzubilden. Im gleichen Kennfeld sind Daten des Inverterwirkungsgrads integriert. Das Kennfeld wird aus bekannten Daten skaliert [93]. Obwohl eine eigene Auslegung der Maschine genauer wäre, ist der gewählte Ansatz für die Bestimmung von Parameterschwankungsbreiten ausreichend. Abbildung 113 zeigt das Wirkungsgradkennfeld zusammen mit einer der Vorauslegung in 5.3.1 entsprechenden Momentenkennlinie:

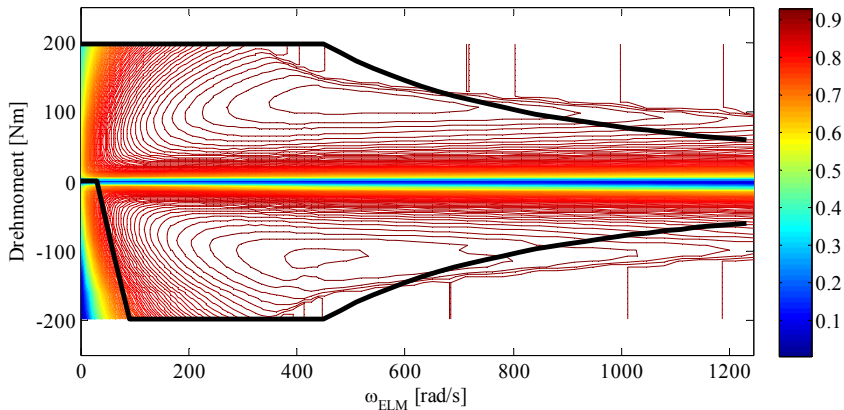


Abbildung 113: Wirkungsgradkennfeld der Traktionsmaschine [93]

Der Wirkungsgrad ist abhängig vom jeweiligen Betriebspunkt bestehend aus Drehmoment und Drehgeschwindigkeit. Mit der Annahme, dass die gesamte Verlustleistung in Wärme umgewandelt wird, lässt sich auf diesem Weg die Wärmelast der Traktionsmaschine berechnen:

$$\text{Verlustleistung Traktionsmaschine} \quad P_{V,HT,ED} = (1 - \eta_{ELM}) \cdot P_{Antrieb} \quad \text{Gl. 53}$$

Mit: η_{ELM} : Wirkungsgrad elektrische Maschine $P_{Antrieb}$: Antriebsleistung (elektrisch)

Die so abgeschätzte Wärmelast wird der Berechnung des Kühlsystems zugeführt. Weitere Einflüsse, wie beispielsweise der Einfluss der Invertereingangsspannung auf die Kennlinien werden hier vernachlässigt.

7.5.6 Modellierung des Kühlsystems (Subsystem CSHT)

In der für das System in 6.5 hergeleiteten Systemarchitektur sind zwei Teilsysteme für das Kühlsystem vorgesehen: ein Hochtemperaturkreislauf und ein Niedertemperaturkreislauf. Beide werden im physikalischen Modell berücksichtigt. Zum Zwecke der Spezifikation soll keine numerische Berechnung der Schnittstellenflüsse aufgebaut werden. Vielmehr soll eine Abschätzung vorgenommen werden, ob die in den Komponentenmodellen abgeschätzten Wärmelasten unter den im Modell verwendeten Umweltrandbedingungen durch das Kühlsystem abgeführt werden können. Dafür muss unter Annahme einiger konstruktiver Randbedingungen der benötigte Kühlmittelstrom bestimmt werden. Ebenso lässt sich eine Abschätzung des Kühlluftbedarfs für das betrachtete Fahrzeug durchführen. Durch einen Vergleich mit der aus den Fahrzeugzuständen abgeleiteten, verfügbaren Kühlluftmenge lassen sich so erste Aussagen für das Kühlsystem tätigen. Diese Aussagen sind sehr grober Natur, da keine strömungsmechanischen Details des Fahrzeugs und des Kühlers berücksichtigt werden können. Dennoch sind Tendenzen und Größenordnungen bestimmbar. Die abgeleitete Modellstruktur für die Abschätzung der Kühlsystemanforderungen zeigt Abbildung 114

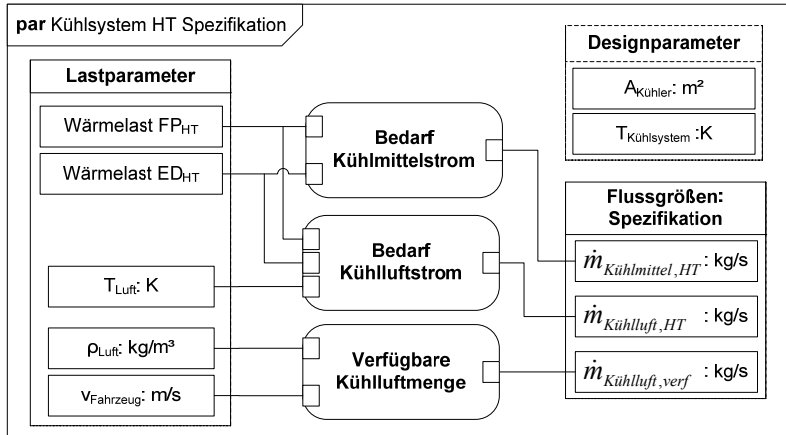


Abbildung 114: Modellstruktur für die Bestimmung der Kühlsystemanforderungen

Wie bereits beschrieben, gilt für alle Abschätzungen der Wärmelasten die Annahme der vollständigen Wärmeabführung durch das Kühlsystem. Dieser Fall tritt in der Realität nicht auf, ermöglicht hier aber die Betrachtung des gesuchten oberen Grenzfalles. Genauere Berechnungen, die etwa den Wärmetransport im Zellstapel detailliert berücksichtigen, können [156] entnommen werden.

Der zur Abfuhr der Wärmelasten des Hochtemperaturkreislaufs benötigte Kühlmittelstrom ergibt sich aus Gl. 54:

$$\text{Benötigter Kühlmittelstrom} \quad \dot{m}_{KM,HT,bedarf} = \frac{P_{V,HT,FP}}{c_{p,KM} \cdot (T_{BZ,a} - T_{BZ,e})} + \frac{P_{V,HT,ED}}{c_{p,KM} \cdot (T_{mot,a} - T_{mot,e})} \quad \text{Gl. 54}$$

$P_{V,HT,FP}$: Verlustleistung Hochtemperatur FP $P_{V,HT,ED}$: Verlustleistung Hochtemperatur ED

T_{BZ} : Temperatur Brennstoffzelle

T_{mot} : Temperatur Antriebsmaschine

$c_{p,KM}$: Wärmekapazität Kühlmittel

In die Abschätzung des Kühlmittelstroms gehen die Temperaturgefälle über den Komponenten ein. Es gilt wiederum die Annahme, dass die gesamte Verlustleistung vom Kühlkreislauf abgeführt wird. Die Temperaturen der Komponenten werden aus Erfahrungswerten besetzt. Da die Temperaturdifferenz zählt, sind Ungenauigkeiten der Absoluttemperaturen vernachlässigbar. Die Kühlmittleingangstemperatur des Brennstoffzellenstapels wird zu 85 °C gesetzt. Der Temperaturanstieg im Zellstapel wird über ein stromabhängiges Kennfeld gemäß der Daten in [147] berechnet. Für die Antriebsmaschine werden 85 °C und 95 °C als Ein- und Ausgangstemperatur gesetzt.

Der benötigte Kühlluftstrom wird analog dazu mit dem Temperaturgefälle zur Umgebungsluft berechnet:

$$\text{Benötigter Kühlluftstrom} \quad \dot{m}_{KL,HT,bedarf} = \frac{P_{V,HT,FP} + P_{V,HT,ED}}{c_{p,L} \cdot (T_{BZ,a} - T_L) \cdot \eta_{Kühler}} \quad \text{Gl. 55}$$

$P_{V,HT,FP}$: Verlustleistung Hochtemperatur FP $P_{V,HT,ED}$: Verlustleistung Hochtemperatur ED

T_{BZ} : Temperatur Brennstoffzelle T_L : Temperatur Luft

$c_{p,L}$: Wärmekapazität Luft $\eta_{Kühler}$: Kühlerwirkungsgrad

Die Lufttemperatur wird dem Modell entsprechend der statistischen Auswahl aus 15.2 zugeführt. Der Kühlerwirkungsgrad ist laut [157] eine Funktion der Anströmfläche des Kühlers. Hier wird ein Wert von 0,65 angenommen.

Zur genauen Bestimmung des verfügbaren Kühlluftstroms wird eine Reihe strömungsmechanischer und konstruktiver Daten benötigt, die bei der hier betrachteten Spezifikationsrechnung noch nicht vorliegen können. Eine rudimentäre Abschätzung erfolgt hier nach Gl. 56:

$$\text{Verfügbare Kühlluftstrom} \quad \dot{m}_{KL,verf} = v_{Fzg} \cdot 0,1 \cdot A_{Kühler} \cdot (\rho_L - 0,1) \quad \text{Gl. 56}$$

Mit: v_{Fzg} : Geschwindigkeit Fahrzeug $A_{Kühler}$: Kühlerfläche

In dieser Abschätzung erfolgt keine genaue Betrachtung der Umströmungsverhältnisse des Kühlers. Es wird lediglich die Anströmgeschwindigkeit mit 10 % der Fahrzeuggeschwindigkeit angenommen [157]. Dabei wird der Einfluss eines Kühlerlüfters, der den Volumenstrom erhöhen kann nicht beachtet. Für die Kühlerfläche wird für das hier betrachtete Referenzfahrzeug [88] eine Kühlerfläche von 0,55 m² geschätzt [157]. In diesem Wert ist berücksichtigt, dass die Kühleranströmfläche bei konventionellen Fahrzeugen etwa 30 -45 % der Kühlluft-Eintrittsöffnung beträgt [158]. Die Dichte der Luft wird aufgrund der Temperaturerhöhung im Kühler abgesenkt. Damit wird berücksichtigt, dass sich der Kühlluftvolumenstrom nach [157] aufgrund der Kühlluftaufheizung um 8-10 % reduziert.

Da die Modellierung des Niedertemperaturkreislaufs analog erfolgt, wird dieses hier nicht weiter betrachtet. Die damit abzuführenden Wärmelasten sind jedoch gering. Mit dem hier beschriebenen Spezifikationsmodell sollen lediglich die Parametergrenzen an den Schnittstellen bestimmt werden. Zur Auslegung können die Zusammenhänge aus [156], [157] oder [159] verwendet werden.

7.5.7 Modellierung der Betriebsstrategie (Subsystem EP)

In jedem hybridisierten Antriebssystem ist die Betriebsstrategie der Energiewandler ein wichtiges Element. Dabei geht es zum einen um den Betriebspunkt der Einzelsysteme, zum anderen betrifft die Betriebsstrategie aber auch die Leistungsaufteilung zwischen den beiden Quellen. Die Einstellung des Betriebspunkts erfolgt bei beiden Energiewandlern über das Einstellen eines Laststroms. Die Spannung und damit auch die Leistung stellen sich als Antwortgröße entsprechend ein. Für die Aufteilung der Leistungen muss auch für die Spezifikation von Parametergrenzen eine einfache Betriebsstrategie implementiert werden. Dies eröffnet die Möglichkeit bereits in frühen Entwurfsphasen Kernelemente des Energiemanagements zu simulieren. In dem hier verwendeten stationären Modell können keine Elemente globaler Optimierung oder Prädiktion verwendet werden. Ebenso wird keine Bremsenergieerückgewinnung untersucht. Dennoch ist es möglich, Auswirkungen der übergeordneten Steuerung auf die Subsystemauslegung zu analysieren. Basierend auf der Funktionsarchitektur lassen sich die in Abbildung 115 dargestellten Funktionsträger ermitteln:

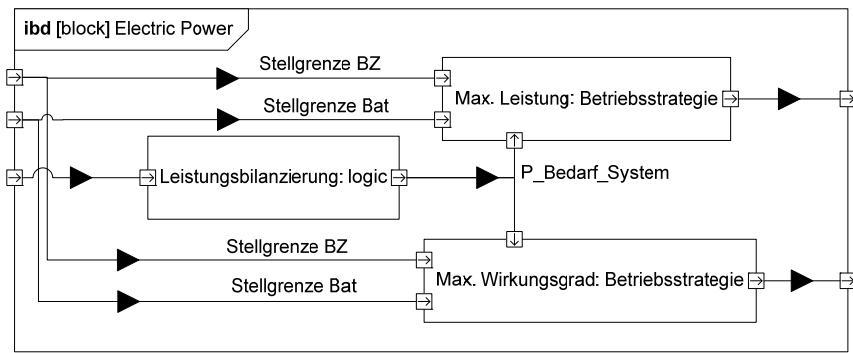


Abbildung 115: Wesentliche Funktionsträger des Subsystems EP (Electric Power)

Auf der Basis von Bedarfsmeldungen der Nebenverbraucher muss eine Leistungsbilanzierung durchgeführt werden. Diese Systembedarfsleistung wird gemeinsam mit den Stellgrenzen von Brennstoffzellen- und Batteriesystem von der Betriebsstrategie zu einer Sollanforderung an die Systeme verarbeitet. In Abbildung 115 sind zwei verschiedene Betriebsstrategien als Funktionselemente dargestellt. Der einfachste Ansatz belastet das Brennstoffzellensystem mit der maximal möglichen Leistung. Nur wenn der Leistungsbedarf des Gesamtsystems die Stellgrenzen der Brennstoffzelle überschreitet, wird eine zusätzliche Batterieanforderung gestellt. Ein anderer Ansatz beruht darauf, die Brennstoffzelle bei gutem Wirkungsgrad, also geringeren Strömen zu betreiben. Auch hier wird der Rest der Bedarfsleistung entsprechend von der Batterie angefordert. Für die Konzeptbeschreibung des Systems sollen diese zwei einfachen Betriebsstrategien verglichen werden

Für das Brennstoffzellensystem kann jede Bedarfsleistung, wie auf den Kennlinien in 12.2.5 dargestellt, auf zwei unterschiedlichen Stromniveaus erreicht werden. Im Subsystem FP wird daher lokal der Wunschstrom vorgegeben und der sich einstellende Betriebspunkt iterativ berechnet. Für die direkte Auswahl des gewünschten Stroms können für die Brennstoffzelle Kennlinien verwendet, die abhängig von der Temperatur den Strom für die maximal erzielbare Leistung vorgeben. Abbildung 116 zeigt die Erstellung dieser Kennlinien aus dem Zelleistungskennfeld für eine befeuchtete Membran und einen Stack nach [147]:

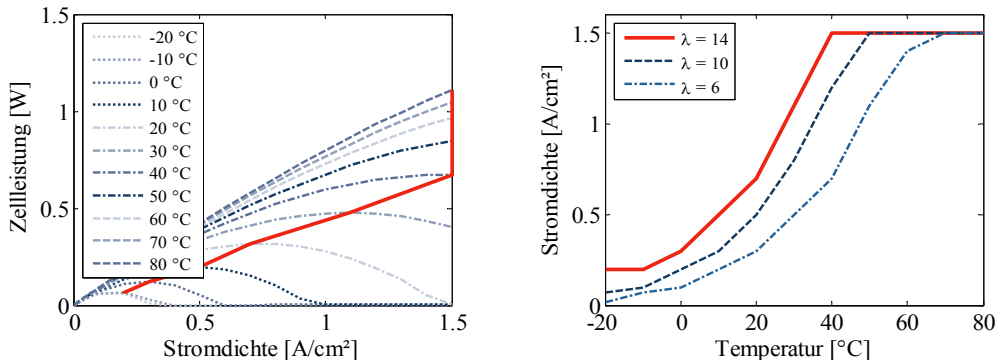


Abbildung 116: Stromkennlinie für maximale Brennstoffzellenleistung

In einem tatsächlich implementierten System würde die Vorgabe des Sollstroms aus dem Energiemanagement durch Ansteuerung der Spannungswandler erfolgen. Hier wird aus Komplexitätsgründen darauf verzichtet, da die Subsystemauslegung untersucht wird und nicht das Energiemanagement. Abbildung 117 zeigt die für die Untersuchung der Leistungsverteilung verwendete Modellstruktur, die die Funktionsträger aus Abbildung 115 realisiert:

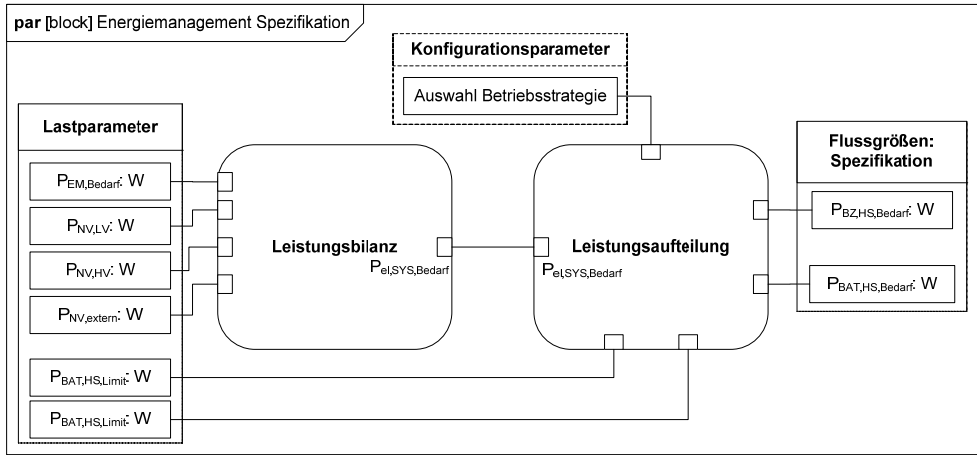


Abbildung 117: Modellstruktur für die Spezifikation des Subsystems EP (Electric Power)

Die Leistungsbilanz addiert alle Bedarfsleistungen der modellierten Nebenverbraucher. Dies gilt sowohl für die Nebenverbraucher des Hochspannungssystems als auch für Nebenverbraucher des Niederspannungssystems. Hier sind vereinfachend konstante Leistungsbedarfe eingestellt. Ein zusätzlicher Leistungsbedarf für die in der Spezifikation definierte externe Steckdose kann bei Bedarf eingestellt werden. Dieser Fall wird jedoch in der folgenden Betrachtung vernachlässigt. In der Leistungsaufteilung sind die zwei Strategien hinterlegt, die über einen Konfigurationsparameter ausgewählt werden. Auf diese Art und Weise sind die Wahl der Betriebsstrategie und die entsprechenden Auswirkungen in die Parametervariation über die Experimentmatrix eingebunden. Die Ausgangsdaten der Leistungsaufteilung sind im Gegensatz zur Struktur der Funktionsträger in Abbildung 115 keine Sollleistungsanforderungen, die vom System eingestellt werden. Vielmehr wird im Sinne der Anforderungsanalyse ein Leistungsbedarf aufgezeichnet, den die beiden Energiewandler im jeweiligen Betriebspunkt liefern müssten.

7.5.7.1 Betrieb bei maximaler Leistung

Beim Betrieb mit maximaler Leistung des Brennstoffzellensystems wird eine einfache Lastfolgestrategie verwendet. Die angeforderte Bedarfsleistung wird vollständig der Leistungsanforderung an das Brennstoffzellensystem zugeordnet. Nach Gl. 57 wird also das Minimum aus elektrischem Leistungsbedarf, der Brennstoffzellen-Stellgrenze und der maximalen Brennstoffzellenleistung gebildet.

$$\begin{array}{l} \text{Anforderung} \\ \text{Brennstoffzelle} \end{array} \quad P_{el,BZ,HS,Bedarf} = \min(P_{el,Sys}; P_{BZ,limit}; P_{BZ,netto}) \quad \text{Gl. 57}$$

$P_{el,Sys}$:	Gesamter elektrischer Leistungsbedarf	$P_{BZ,limit}$:	Aktuelle Stellgrenze der Brennstoffzelle	$P_{BZ,netto}$:	Maximale BZ-Nettoleistung
----------------	---------------------------------------	------------------	--	------------------	---------------------------

Ein eventuell auftretendes Leistungsdefizit wird dem Batteriesystem zugeordnet, wie in Gl. 58 dargestellt:

$$\begin{array}{l} \text{Anforderung} \\ \text{Batterie} \end{array} \quad P_{el,BAT,HS,Bedarf} = \min((P_{el,Sys} - P_{el,BZ,HS,Bedarf}); P_{BAT,limit}; P_{BAT,netto}) \quad \text{Gl. 58}$$

$P_{el,Sys}$:	Gesamter elektrischer Leistungsbedarf	$P_{BAT,limit}$:	Aktuelle Stellgrenze Batterie	$P_{BAT,netto}$:	Maximale BAT-Nettoleistung
----------------	---------------------------------------	-------------------	-------------------------------	-------------------	----------------------------

Bekannte Betriebsstrategien [160], [161] verwenden für die Bildung der Leistungsanforderungen an das Brennstoffzellensystem zusätzliche Dynamikrestriktionen. Dadurch wird die Dynamik der Gasversorgung im Zellstapel berücksichtigt. Eine Unterversorgung mit Reaktionsgase bei Lastaufbau und ein

zu hoher Druck bei Lastabbau werden vermieden. Für die Betrachtung von Grenzfällen bei statischen Betriebspunkten ist die Verwendung ähnlicher Elemente hier jedoch nicht notwendig. Die beschriebene Lastfolgestrategie hat den Nachteil, dass sie den Systemwirkungsgrad nicht beachtet. Nach [161] wird dabei ein weites Band an Wirkungsgradpunkten durchfahren. Dadurch bestehen Verbrauchs Nachteile gegenüber Strategien, die die Brennstoffzelle bei möglichst konstanter Last betreiben (Load leveling) und dynamische Schwankungen stärker mit der Batterie ausgleichen. Für solche Betrachtungen müssen dynamische Zyklussimulationen verwendet werden, die erst mit später im Entwicklungsprozess zur Verfügung stehenden, detaillierteren Modellen möglich sind.

7.5.7.2 Betrieb bei maximalem Wirkungsgrad

Die Leistungsverteilung für den Betrieb bei maximalem Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems entspricht einem Ansatz aus [160]. Dabei wird ein Betriebsfenster gewählt, welches den Bereich hohen Systemwirkungsgrads in einstellbaren Grenzen umfasst. Das System wird wenn möglich innerhalb dieser Grenzen betrieben. Ein Ansatz aus [162], der eine Minimierung eines äquivalenten Wasserverbrauchs anstrebt, führt im Grunde auf den gleichen Betriebsbereich. Abbildung 118 zeigt schematisch ein solches Wirkungsgradfenster für die Wirkungsgradkennlinie aus [47]:

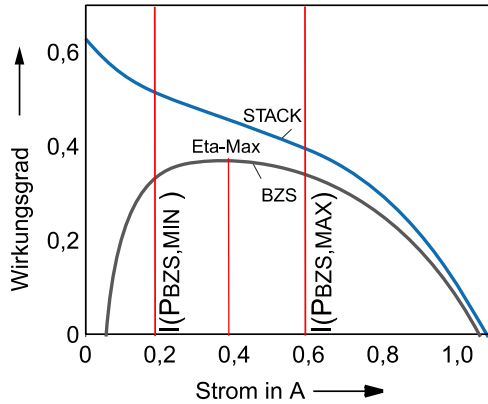


Abbildung 118: Betrieb des Brennstoffzellensystems innerhalb eines Fensters mit hohem Wirkungsgrad

In Abbildung 118 sind zwei Ströme vorgegeben. Im Modell werden die Grenzen als Bereich der Brennstoffzellen-Nettoleistung angegeben. Dazu werden zwei einstellbare Parameter verwendet, wie in Gl. 59 und Gl. 60 gezeigt:

$$\text{Obere Leistungsgrenze} \quad P_{el,BZ,eta_high} = \alpha_H \cdot P_{BZ,netto} \quad \text{Gl. 59}$$

$$\text{Untere Leistungsgrenze} \quad P_{el,BZ,eta_low} = \alpha_L \cdot P_{BZ,netto} \quad \text{Gl. 60}$$

In der hier durchgeführten Untersuchung werden die Grenzen auf 10 % und 60 % der Nettoleistung der Brennstoffzelle gesetzt. Eine Ergebnisgröße der Leistungsaufteilung, die im Algorithmus verwendet wird, ist das in Gl. 61 berechnete Systemleistungsdefizit. Es stellt einen Leistungsmangel dar, wenn Brennstoffzelle und Batterie gemeinsam die geforderte Systemleistung nicht erreichen können.

$$\text{Systemleistungsdefizit} \quad P_{el,SYS,Defizit} = P_{el,SYS} - P_{el,BZ,HS,Bedarf} - P_{el,BAT,HS,Bedarf} \quad \text{Gl. 61}$$

Diese Ausgangsgröße muss im Normalfall gleich null sein. Ist dies nicht der Fall, sorgt das Systemleistungsdefizit dafür, dass das Wirkungsgradfenster verlassen wird. Die angeforderte Brennstoffzellenleistung wird über die obere Leistungsgrenze erhöht. Dies zeigt sich an der aktualisierten Stellgrenze in Gl. 62, die als Minimum aus der physikalisch möglichen Stellgrenze und der um das Systemleistungsdefizit angehobenen Leistungsgrenze gebildet wird:

$$\text{Aktualisierte Stellgrenze} \quad P_{el,BZ,Limit,max} = \min(P_{BZ,limit}, (P_{el,SYS,Defizit} + P_{el,BZ,eta_high})) \quad \text{Gl. 62}$$

Diese aktualisierte Stellgrenze wird verwendet um ein Brennstoffzellendefizit nach Gl. 63 zu berechnen:

$$\text{Brennstoffzellendefizit} \quad P_{el,BZ,Defizit} = P_{el,SYS} - P_{el,BZ,Limit,max} \quad \text{Gl. 63}$$

Mit Hilfe dieser Größen können jetzt die Stellanforderungen an die Energiewandler erzeugt werden. Gl. 64 zeigt die Stellanforderung an die Batterie unter Beachtung der physikalischen Stellgrenze:

$$\text{Anforderung Batterie} \quad P_{el,BAT,HS,Bedarf} = \min(P_{BAT,limit}, P_{el,BZ,Defizit}) \quad \text{Gl. 64}$$

Die Anforderung an die Brennstoffzelle in Gl. 65 wird zwischen der unteren Leistungsgrenze des Wirkungsgradfensters und der Leistungsanforderung angesetzt. Dabei wird die aktualisierte Stellgrenze aus Gl. 62 beachtet:

$$\begin{array}{l} \text{Anforderung} \\ \text{Brennstoffzelle} \end{array} \quad P_{el,BZ,HS,Bedarf} = \max\left(P_{el,BZ,eta_low}; \min(P_{el,SYS}; P_{el,BZ,Limit,max})\right) \quad \text{Gl. 65}$$

Mit der so definierten Strategie wird ein Wirkungsgradfenster definiert, welches nur verlassen wird, wenn die Brennstoffzellenleistung nicht ausreicht. Übergeordnet gilt also auch hier eine Lastfolgestrategie, bei der die Leistungsanforderung nach Möglichkeit durch die Brennstoffzelle abgedeckt wird. Erweiterungen könnten auch hier eine stärkere Lastglättung der Brennstoffzelle vorsehen. Für das einfache Modell zur Berechnung der Schwankungsbreiten von Parametern ist dies nicht vorgesehen. Einflüsse durch Rekuperation, globale Optimierung oder Vorausschau, wie in [162] beschrieben können für ein stationäres Modell ebenfalls nicht umgesetzt werden. Dies sind mögliche Erweiterungen für nachfolgende dynamische Simulationen.

7.6 Lastpunktsimulation und Auswertung

Das beschriebene Modell und die Vorverarbeitung der Daten wurden vollständig in Matlab/Simulink implementiert. Mit den Klimadaten aus [134] und dem Referenzfahrzeug aus der Vorauslegung wurden Simulationen für die vollständige Versuchsmatrix für eine Reihe weltweiter Standorte durchgeführt. Für alle Simulationen wurde eine Anzahl von 50 Experimenten vorgegeben. Mit einer Matrix mit 64 Zeilen und 3 betrachteten Betriebspunkten ergibt sich für die hier durchgeführten Simulationen eine Anzahl von 9600 Punkten, die berechnet wurden. Eine höhere Anzahl von Punkten zu simulieren ist nicht sinnvoll, da die Anzahl der hinterlegten Fahrzyklen zu gering ist.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Auswertung und die physikalische Spezifikation für die einzelnen Größen der Subsysteme dargestellt. Falls klimaabhängige Änderungen der Systemanforderungen auftreten, werden diese beispielhaft dargestellt. Dies betrifft die Anforderungen an das Luftsystem der Brennstoffzelle und die Kühlungsrandbedingungen. Im Wesentlichen zeigt sich aber eine hohe Stabilität der Anforderungen, da die Temperatur des Zellstapels konstant gehalten wird und die Eingangsstoffströme auf Sollwerte der Zellstapelspezifikation eingestellt werden. Im Anschluss an die Ergebnisbeschreibungen erfolgt eine Sensitivitätsanalyse für die Einflüsse einzelner relevanter Faktoren im Modell.

Alle Ergebnisgraphiken zeigen, wie in Abbildung 91 dargestellt, drei Boxplots. Die Boxplot-Darstellung zeigt einen Rahmen, dessen Ränder auf dem 25. Perzentil und dem 75. Perzentil der Daten liegen. Eine Mittelmarkierung zeigt den Median und zwei Markierungen außerhalb des Rahmens zeigen Maximum und Minimum. Die Boxplot-Darstellung ermöglicht es schnelle Aussagen über die Daten zu tätigen, ohne deren genaue Verteilung zu kennen [163]. Die drei nebeneinander dargestellten Boxplots repräsentieren die Schwankungsbreite der jeweiligen Anforderung bei einer Belastung des Systems mit 75 %, 90 % und 100 % der Maximalleistungsanforderung der untersuchten Zyklen. Eine technische Spezifikation kann im einfachsten Fall als Maximalwert der Schwankungsbreite für den 100 %-Fall bestimmt werden. Dieser Wert deckt die Anforderungen aller untersuchten Betriebspunkte ab. Die parallele Darstellung der Ergebnisdaten für die reduzierten Systembelastungen verdeutlichen die Sensitivität der Subsystemanforderungen auf eine Reduktion der Systemleistungsanforderung. Als Referenzgröße ist in einem vierten Boxplot für jede Anforderung der Referenzwert für den NEFZ-Zyklus dargestellt. Zur Erzeugung der Referenzwerte wurde eine Simulation mit der gleichen Betriebspunktzahl, jedoch mit fest ausgewähltem Zyklus durchgeführt.

7.6.1 Auswertung des Leistungsbedarfs des Antriebssystems

Der Leistungsbedarf des Antriebssystems zeigt die in der Simulation vorgegebenen Betriebspunkte. Die Ergebnisdarstellung für den Standort „Stuttgart“ (Höhe: 314 m, mittlere relative Feuchte: 75 %, Jahresmitteltemperatur 9,5 °C) zeigt Abbildung 119:

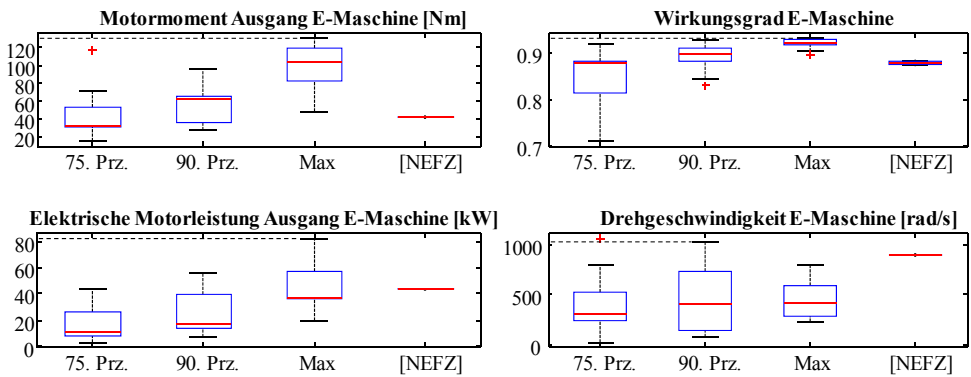


Abbildung 119:Fahrleistungsanforderungen (Stuttgart)

Die Drehmomentanforderungen (oben links) liegen signifikant höher als der Vergleichswert des NEFZ-Zyklus. Für die Traktionsmaschine ergibt sich wie erwartet ein hoher Wirkungsgrad, insbesondere bei hohen Lasten, wie der Boxplot der Wirkungsgrade (oben rechts) für die Maximalleistungen zeigt. Für die elektrische Motorleistung sind die Daten der Parameterspezifikation in Tabelle 10 zusammengestellt:

	75 % Last	90 % Last	Maximallast	NEFZ(Max)
El. Motorleistung (Max)	43,8	56,5	82,8	43,4
El. Motorleistung (Min)	3,4	6,6	19,9	43,4
Intervallbreite	210,2 %	121,4 %	81,8 %	-
Standardabweichung	32,2	18,3	23,9	-

Tabelle 10: Parameterspezifikation der elektrischen Motorleistung [kW]

Die maximale elektrische Motorleistung (unten links) schwankt für die ausgewählten Zyklen zwischen 19,9 kW und 82,8 kW. Die Maximalleistung für den NEFZ-Zyklus liegt mit 43,4 kW in der Mitte dieses Spektrums. Die Intervallbreite zeigt das Verhältnis der Spanne zwischen Maximum und Minimum zum Mittelwert. Diese Kennzahl wird hier aufgeführt um darzustellen, wie sehr der Parameter in Abhängigkeit der durchgeführten Systemvariation schwankt. Ist die Schwankung hoch, muss die Komponente über einen viel höheren Wirkungsbereich ausgelegt werden um alle betrachteten Fälle abdecken zu können.

Für Drehmoment und elektrische Leistung zeigt sich ein deutlicher Effekt, wenn die Lastanforderung reduziert wird. Wenn das System nur mit dem geringeren Lastkollektiv betrieben wird (mit höchstens 90 % der im Zyklus auftretenden Maximalleistung), reduziert sich der maximale Leistungsbedarf an der elektrischen Maschine überproportional stark um 46,4 % auf 56,5 kW, da sich auch die dynamischen Anforderungen der betrachteten Zyklen reduzieren und eine Betriebspunktverschiebung im Motorkennfeld stattfindet. Der maximale Drehmomentbedarf sinkt um 36,1 %. Eine Anforderungsreduktion hat also gerade bei der Antriebsauslegung sehr starke Auswirkungen.

7.6.2 Auswertung der benötigten Stoffströme

Für die nach 7.5.2.2 und 7.5.2.3 berechneten Stoffstrom-Anforderungen für Wasserstoff und Luft, ergeben sich die in Abbildung 120 und Abbildung 121 dargestellten Ergebnisse. In der Darstellung ist jeweils der stöchiometrische Massenstrom, das gewählte Stöchiometrieverhältnis gemäß der Strategie

aus [147] und der Gesamtmassenstrom unter Berücksichtigung des Überschusses und der Zellzahl dargestellt.

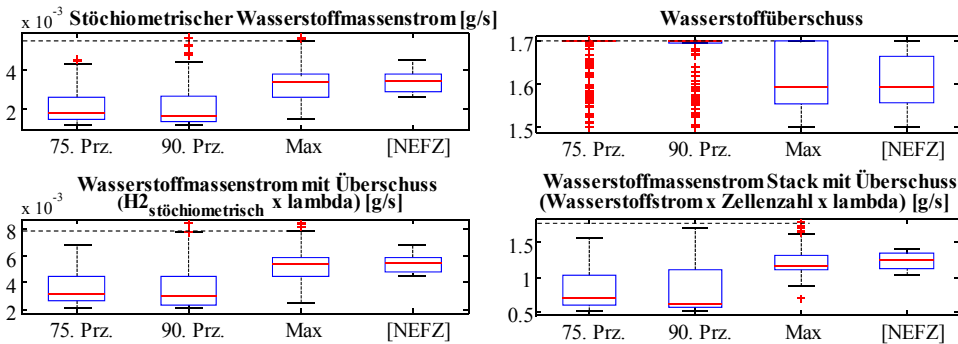


Abbildung 120: Anforderungen des Wasserstoffmassenstroms (Stuttgart)

Tabelle 11 zeigt die Zusammenstellung der Kennzahlen für den Gesamtmassenstrom des Zellstapels:

	75 % Last	90 % Last	Maximallast	NEFZ(Max)
H ₂ -Massenstrom (Max)	1,6	1,7	1,8	1,4
H ₂ -Massenstrom (Min)	0,5	0,5	0,7	1
Intervallbreite	127,7%	145,1%	90,2%	31 %
Standardabweichung	0,3	0,3	0,3	0,1

Tabelle 11: Parameterspezifikation des H₂-Massenstroms [g/s]

Für die Maximalleistungen der Zyklen ergibt sich ein Wasserstoffmassenstrom von 0,7 g/s bis 1,8 g/s. Eine Absenkung der Anforderungen auf 90 % reduziert den maximalen Massenstrom um lediglich 4,7 %. Die mittleren Massenströme für den NEFZ liegen in ähnlichen Bereichen, da die auftretenden Ströme ähnlich sind. Die Intervallbreite ist mit 31 % dagegen deutlich enger. Für die Wasserstoffdosierung ist aufgrund der geringen Schwankungen eine Auslegung auf den maximal auftretenden Massenstrom vertretbar. Ein vergleichbares Bild gilt für den Luftmassenstrom in Abbildung 121 und Tabelle 12:

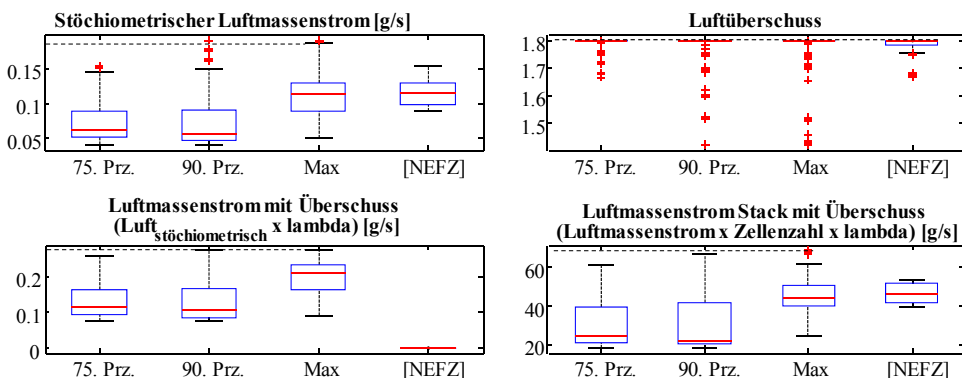


Abbildung 121: Anforderungen des Luftmassenstroms (Stuttgart)

	75 % Last	90 % Last	Maximallast	NEFZ(Max)
Luftmassenstrom (Max)	61,7	66,7	68,9	53,6
Luftmassenstrom (Min)	18,6	18,6	24,6	39,7
Intervallbreite	141,1 %	159,3 %	97,5 %	29,8 %
Standardabweichung	10,7	12,7	9,1	5,2

Tabelle 12: Parameterspezifikation des Luftmassenstroms [g/s]

Für die maximale Leistungsanforderung der Zyklen schwankt die Luftmassenstrom-Anforderungen zwischen 24,6 g/s und 68,9 g/s. Im Vergleich dazu schwankt die Luftanforderung für das Maximum der NEFZ-Leistung zwischen 39,7 g/s und 53,6 g/s. Eine Reduktion der Anforderungen auf 90 % der Maximallast reduziert den maximalen Luftmassenstrom um lediglich 3,2 %. Auch für die Luftförderung ist eine Auslegung auf die Maximalanforderung daher sinnvoll um alle Systemvarianten bedienen zu können.

7.6.3 Auswertung der elektrischen Leistungsverteilung

Zur Auswertung der elektrischen Leistungen wird die elektrische Bedarfsleistung der Traktionsmaschine mit den Leistungen der zwei Energiewandler auf der Bordnetzseite verglichen. Auf der Bordnetzseite liegt die Nettoleistung hinter den Wandlern an. In der Parametervariation werden, wie in 7.4 beschrieben, Varianten mit oder ohne Spannungswandler betrachtet. Die Bruttoleistung des Brennstoffzellenstapels wird in der Auswertung als Summe der benötigten Netto-Leistung und der Verdichterleistung dargestellt. Abbildung 122 zeigt die Bruttoleistung im Vergleich zur Leistungsanforderung der Traktionsmaschine:

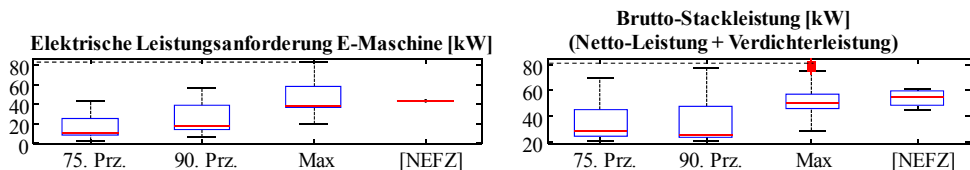


Abbildung 122: Brutto-Stackleistung im Vergleich zur elektrischen Leistungsanforderung

Die Datentabelle für die Bruttoleistung des Zellstapels zeigt, dass das Maximum des Anforderungsintervalls die volle zur Verfügung stehende Brutto-Stapelleistung von 82 kW (70 kW Nettoleistung) ausnutzt. Einige der betrachteten Betriebspunkte liegen oberhalb dieser Leistung (Abbildung 122 links). Damit wird die Batterieleistung angefordert, um diese in dynamischen Vorgängen auftretenden Höchstleistungen abzudecken.

	75 % Last	90 % Last	Maximallast	NEFZ(Max)
Brutto-Stackleistung (Max)	70	77,4	82,1	61,2
Brutto-Stackleistung (Min)	21	21	28	44,6
Intervallbreite	141,6 %	162,9 %	102,2 %	30,9 %
Standardabweichung	12,3	15,3	12,6	6,4

Tabelle 13: Parameterspezifikation der Brutto-Stackleistung [kW]

Die Anforderungsschwankung für die benötigte Stapelleistung ist mit 102,2 % wie erwartet deutlich höher als im NEFZ-Zyklus. Dieser Zyklus eignet sich demnach nicht zur dynamischen Bewertung der Anforderungen. Auf der Bordnetzseite sind die Leistungsanforderungen um die Wandlerverluste reduziert, wie in Abbildung 123 dargestellt (oben rechts). Leistungsanforderungen für die Batterie schwanken sehr stark, von 0 kW bis 27,2 kW (Abbildung 123 oben links und Tabelle 14). Ebenfalls dargestellt sind die während der Simulation auftretenden Stellgrenzen der beiden Energiewandler:

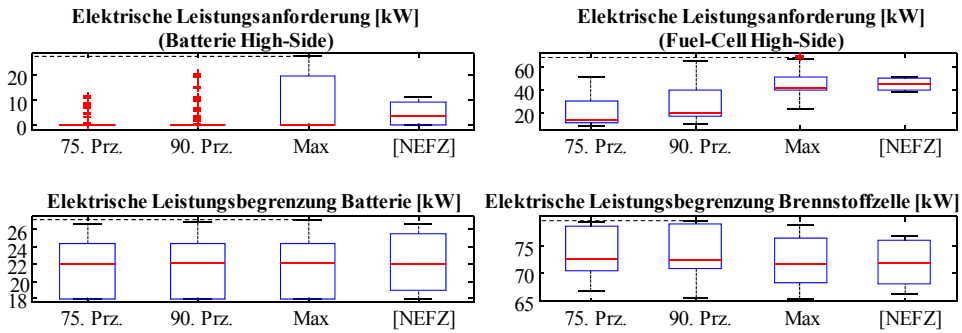


Abbildung 123: Elektrische Leistungsanforderungen (Stuttgart)

	75 % Last	90 % Last	Maximallast	NEFZ(Max)
Batterieanforderung (Max)	11,4	20,3	27,2	11,2
Batterieanforderung (Min)	0	0	0	0
Intervallbreite	1576,6 %	1127,3 %	419,2 %	247,8 %
Standardabweichung	2,4	4,8	9,1	4,7

Tabelle 14: Parameterspezifikation der Batterieleistung auf der Bordnetzseite [kW]

Die elektrische Leistungsbegrenzung der Brennstoffzelle, die die Stellgrenze im Betrieb darstellt, zeigt Tabelle 15:

	75 % Last	90 % Last	Maximallast	NEFZ(Max)
Brennstoffzellenanforderung (Max)	79,2	79,3	78,5	76,7
Brennstoffzellenanforderung (Min)	66,7	65,6	65,4	66,3
Intervallbreite	17,0 %	18,5 %	18,2 %	14,4 %
Standardabweichung	4,2	4,3	4,2	4

Tabelle 15: Parameterspezifikation für die im Betrieb auftretende Stellgrenze der Brennstoffzelle [kW]

Obwohl die Intervallbreite sehr gering ist, kann die Maximalleistung nicht immer gewährleistet bleiben. Insbesondere zur Berücksichtigung der Degradation der Zelleistung im Verlauf der Lebensdauer muss sichergestellt werden, dass das sinkende Leistungsangebot der Brennstoffzellen für den vollen spezifizierten Betrieb ausreicht.

Die Auswertung für die Nebenverbraucher Kompressor und Rezirkulationspumpe und die gesamte elektrische Leistungsanforderung aus dem Bordnetz zeigt Abbildung 124:

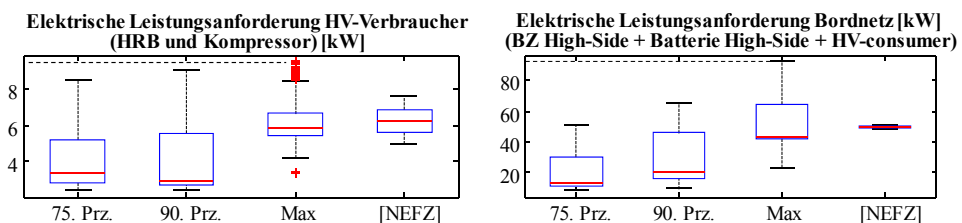


Abbildung 124: Elektrische Leistungsanforderungen (Verbraucher und Bordnetz) (Stuttgart)

Diese Auswertung vermittelt einen Eindruck über die gesamte auftretende Systemleistung. Zusammen mit den Leistungen der Energiewandler ergibt sich das Übertragungsverhältnis für die Spannungswandler, in Abbildung 125:

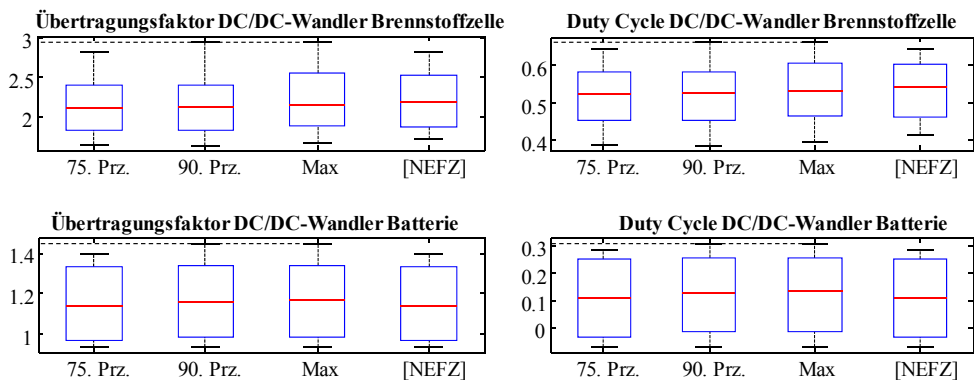


Abbildung 125: Anforderungen an Spannungswandler (Stuttgart)

Diese Übertragungsfaktoren für die Wandler sind nach [164] nicht hoch. Der entsprechende Aussteuergrad (Duty Cycle) sollte nach [164] unter 0,9 liegen. Entscheidender für die Spezifikation sind die Schwankungen der anliegenden Spannungen. Niedrige Spannungen bewirken höhere Ströme, welche die Halbleiter belasten. Für den angeschlossenen Antrieb aus Inverter und Traktionsmaschine ist ein möglichst konstanter Betrieb der Bordnetzspannung vorteilhaft. Dadurch kann nach [165] eine hohe Antriebsleistung mit moderaten Strömen gestellt werden. Für die Maschine ergeben sich dadurch Vorteile bezüglich Kosten, Masse und Bauvolumen [165].

7.6.4 Auswertung der Brennstoffzellenparameter

Die Eingangsanforderungen des Brennstoffzellensystems sind in Abbildung 126 dargestellt:

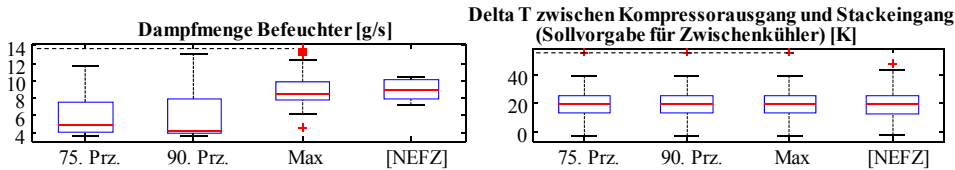


Abbildung 126: Anforderungen für Eingangsparameter des Brennstoffzellensystems (Stuttgart)

Die Dampfmenge, die der zugeführten Umgebungsluft zugeführt werden muss, ist in Tabelle 16 dargestellt:

	75 % Last	90 % Last	Maximallast	NEFZ(Max)
Dampfmenge (Max)	11,7	13,2	13,7	10,5
Dampfmenge (Min)	3,7	3,6	4,7	7,2
Intervallbreite	135,6 %	162,7 %	102,2 %	36,0 %
Standardabweichung	2,1	2,5	1,8	1

Tabelle 16: Parameterspezifikation der Befeuchter-Dampfmenge [g/s]

Für die maximalen Leistungsanforderungen der betrachteten Zyklen ergibt sich unter Variation aller betrachteten Faktoren ein Intervall von 4,7 g/s bis 13,7 g/s. Dieser Wertebereich ist deckungsgleich mit dem in [151] dargestellten Schwankungsbereich bei einem Brennstoffzelleneingangsdruck von etwa 2 bar. Der Brennstoffzellenausgangsdruck ergibt sich hier als reine Kennfeldberechnung in Abbildung 127:

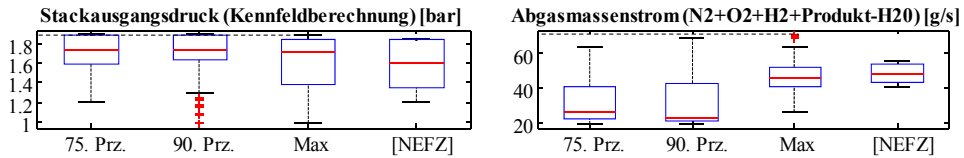


Abbildung 127: Anforderungen für Brennstoffzellenparameter (Stuttgart)

In realen Systemen müssen Befeuchter und Zwischenkühlung gemeinsam betrachtet werden, da im Befeuchter ein Wärmeaustausch stattfindet. Im hier betrachteten System steht die auszugleichende Temperaturdifferenz in Abbildung 126 bei 20 K. Diese Spanne liegt im realistischen Wirkungsbereich eines Wärmetauschers.

7.6.5 Auswertung der Kühlungsrandbedingungen

Von großer Bedeutung für das Brennstoffzellensystem sind die Kühlungsrandbedingungen in Abbildung 128:

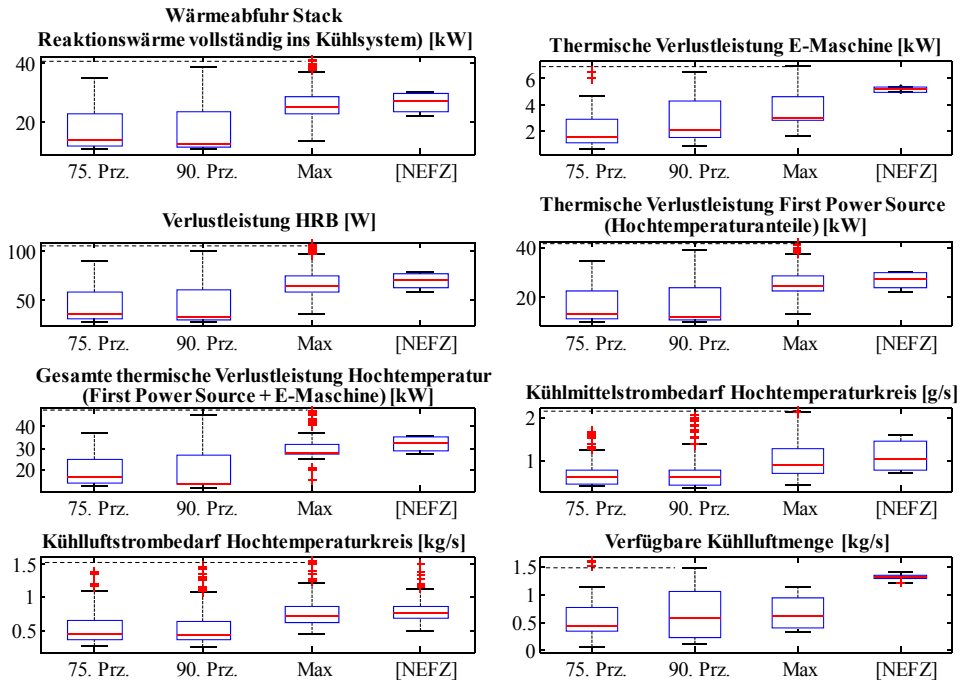


Abbildung 128 Kühlungsanforderungen Hochtemperaturkreislauf (Stuttgart)

Obwohl die hier durchgeführten Abschätzungen nur Näherungen liefern können, sind wertvolle Tendenzen aus der Parametervariation ablesbar. Die aus der Wirkungsgradabschätzung bestimmte Wärmeabfuhr des Zellstapels schwankt für den Maximalfall zwischen 13,8 kW und 41 kW. Sie entspricht also im ungünstigsten Fall etwa der halben Nennleistung (unter Verwendung der oberen Heizwertspannung zur Wirkungsgradberechnung). Diese Wärmelast ist für den Fahrzeugbetrieb nützlich, um Systemerwärmung, Kabinenheizung oder Scheibenteisung zu ermöglichen. Für den Extremfall hoher Fahrleistungsanforderungen bei ungünstigen Umgebungsbedingungen muss jedoch sichergestellt sein, dass die begrenzte Kühlerfläche im Fahrzeug ausreicht. Durch den geringen Temperaturunterschied zwischen Zellstapel und Kühlsystem müssen diese Kühlerflächen größer sein als in konventionellen Fahrzeugen. In Abbildung 128 sind alle Wärmelasten zusammengefasst. Als Indikation über die Kühlsituation kann der Vergleich aus verfügbarer Kühlluftmenge und dem Kühlluftstrombedarf angesehen werden. Für den Vergleichsfall des NEFZ-Zyklus zeigen sich keine Schwierigkeiten. Im Falle der maximalen Zykluslast zeigt sich aber für die verfügbare Kühlluftmenge ein Intervall (0,3 kg/s – 1,1 kg/s), das in der gleichen Größenordnung liegt wie der Kühlluftbedarf

(0,4 kg/s-1,6 kg/s). Selbst wenn die Absolutwerte aufgrund der groben Abschätzung nicht überinterpretiert werden sollten, zeigt sich dennoch, dass die Kühlungssituation bei voller Systembelastung kritisch sein kann. Hier kann eine maximale Ausnutzung verfügbarer Kühlflächen im Fahrzeug oder eine Leistungsreduktion im Heißlandbetrieb notwendig sein. Die gesamte Wärmelast reduziert sich zudem bei einer Verringerung der elektrischen Last auf das 90. Perzentil nur um 4,4 %. Die Kühlungssituation für den Niedertemperaturkreislauf zeigt Abbildung 129:

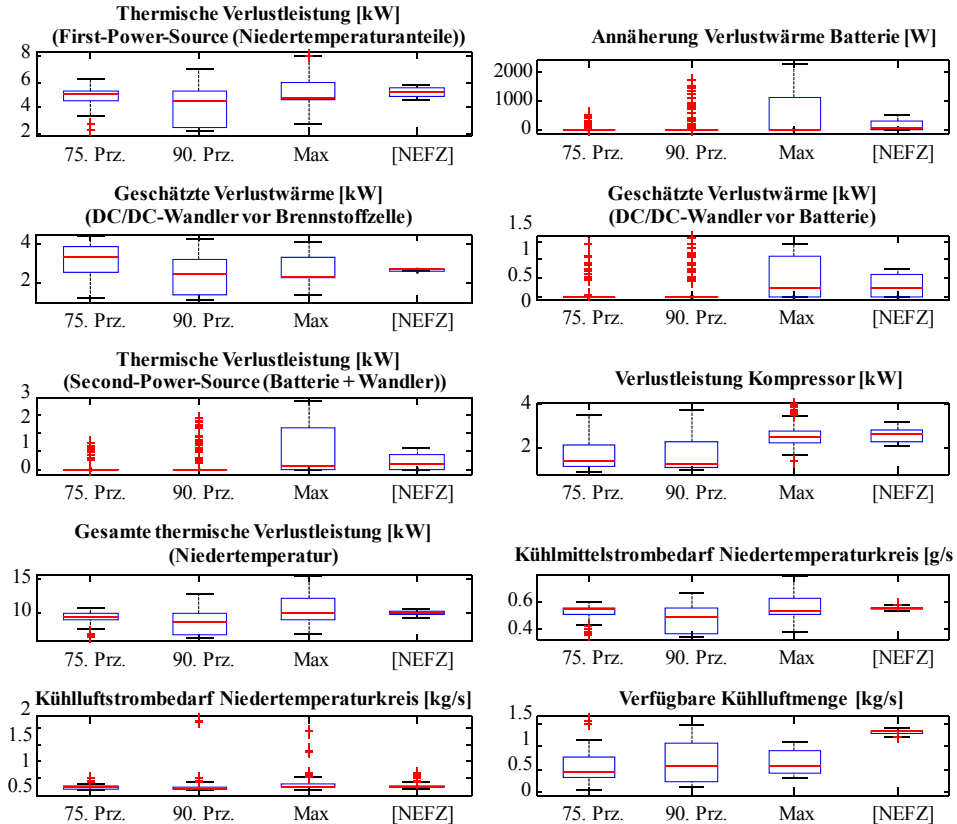


Abbildung 129: Kühlungsanforderungen Niedertemperaturkreislauf (Stuttgart)

Die Aufstellung zeigt die Wärmeverluste der Spannungswandler, der Batterie und einiger Nebenverbraucher. Wie zuvor gilt hier die Annahme, dass die gesamte Verlustleistung als Wärmelast vom Kühlmittel abgeführt wird. Dies kann daher als oberer Grenzfall betrachtet werden. Die Wärmelast des Niedertemperaturkreislaufs reduziert sich nach dieser Abschätzung bei einer Reduktion der Fahrleistung auf das 90. Perzentil um 20,8 %. Diese Reduktion ergibt sich hauptsächlich aus der reduzierten Wärmeentwicklung der Batterie, die in der hier durchgeführten Simulation bei den reduzierten Fahrleistungen fast gar nicht mehr angefordert wird.

7.7 Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Szenarien

Die beschriebenen Ergebnisse aus der stationären Systemsimulation unter systematischer Parametervariation liefern eine gute Abschätzung für den Wertebereich der physikalischen Spezifikation. Die Maximalwerte der Verteilung für die höchsten Fahrleistungsanforderungen können unter den verwendeten Annahmen als Anforderung für die vollständige Abdeckung aller Verwendungsszenarien gesehen werden. Ein hoher Mehrwert ergibt sich jedoch, wenn man die Möglichkeiten der Sensitivitätsanalyse mit dem dargestellten Modell nutzt. Dadurch kann eine veränderte Parameterstreuung in Abhängigkeit bestimmter Einflüsse analysiert werden. Zusätzlich zur Beschreibung der technischen Wirkungen kann die Kostenwirkung auf der Basis von Studien wie [166] und [99] ermittelt werden. Der Genauigkeit der Modellierung entsprechend werden Extremwerte, Tendenzen

und qualitative Wirkungen diskutiert; sie sind keine exakten Parameterwerte. Im Folgenden werden beispielhaft einige ausgewählte Einflüsse und deren Auswirkungen auf die physikalische Systemspezifikation dargestellt.

7.7.1 Auswirkungen der Einsatzregion

Um die Auswirkungen verschiedener Umweltbedingungen zu testen, wurden die von [167] aufbereiteten Klimadaten aus [134] verwendet. Um markante Einflüsse festzustellen wurden hier zwei Regionen ausgewählt, die den Bedingungen Heißland (Phoenix, Arizona: Höhe: 344 m, mittlere relative Feuchte: 37 %, Jahresmitteltemperatur: 22,6 °C), und Höhenfahrt (Zugspitze: Höhe: 2960 m, mittlere relative Feuchte: 81 %, Jahresmitteltemperatur: - 4,8 °C) entsprechen. Für beide Datensätze wurde die gleiche Experimentzahl simuliert und damit die gleiche Anzahl an stationären Betriebspunkten. Als Maß für den Grad einer Parameterveränderung gilt die Spanne dieser Änderung bezogen auf den Originalwert (Stuttgart). Alle Vergleiche sind für die Ergebnisverteilung der maximalen Fahrleistungen durchgeführt.

7.7.1.1 Technische Auswirkungen

Für die Heißlanduntersuchung (Phoenix) ergeben sich die folgenden Auswirkungen:

- **Leistungsanforderung Brennstoffzelle:** Die Maximalwerte zeigen kaum Abweichung. Das 75. Perzentil (75 % der Ergebniswerte liegen darunter) erhöht sich um 18 % auf 63 kW. Die Verteilung der Leistungswerte verschiebt sich also nach oben in den Bereich der Maximalleistung.
- **Erforderliche Verdichterleistung:** Die erforderliche Verdichterleistung steigt im Maximum um 3,9 %, das 75. Perzentil steigt um 9,2 %. Auch hier verschiebt sich die Verteilung nach oben. Die geringere Luftdichte bei hohen Umgebungstemperaturen ist einer der Gründe für erhöhten Verdichtungsbedarf
- **Erforderliche Zwischenkühlung:** Das Maximum bleibt etwa konstant. Das 75 % Perzentil erhöht sich um 38,4 % auf 42,4 °C. Der Minimalwert erhöht sich um 118,1 %. Dies ist eine direkte Auswirkung der erhöhten Außentemperatur
- **Erforderliche Dampfmenge:** Die Maximalwerte zeigen keine Veränderung. Das 75. Perzentil ist um 4,3 % erhöht. Dies ist eine direkte Folge der geringeren Luftfeuchtigkeit für Phoenix.
- **Wärmelast Hochtemperaturkreislauf:** Das Maximum der Wärmelast steigt um 2,2 % auf 48,4 kW. Das 75. Perzentil steigt um 18,7 %. Hier findet also auch eine deutliche Verschiebung der gesamten Verteilung nach oben statt. Insbesondere steigt der abgeschätzte Kühlluftbedarf um 27,3 %. Für stark erhöhte Außentemperaturen muss demnach eine Leistungsreduktion vorgesehen werden.

Für die Höhenfahrt (Zugspitze) ergeben sich die folgenden Auswirkungen:

- **Erforderliche Zwischenkühlung:** Aufgrund der niedrigen Außentemperatur sinkt der Kühlbedarf deutlich, um 53 %
- **Kühlluftbedarf:** Der Kühlluftbedarf sinkt um 42 %
- **Luftmassenstrom:** Der Luftmassenstrom ist geringfügig erhöht. Allerdings ist in dem Modell keine spezielle Strategie für Höhenbetrieb implementiert. Durch den absinkenden Umgebungsdruck sinkt die Luftdichte und der Volumenstrom erhöht sich. Zusätzliche Druckverluste müssen berücksichtigt werden. Die Effekte von Temperatur und Druck auf den Dampfanteil in der Luft sind gegenläufig. Der absinkende Druck erhöht die Dampfmenge nach Gl. 34. Die absinkende Temperatur senkt die Dampfmenge. Die feinen Abhängigkeiten werden in der hier betrachteten Modellgenauigkeit nicht abgebildet.

7.7.1.2 Kostenwirkung

Um eine Kostenwirkung der dargestellten Parametervariationen zu beschreiben, wird eine qualitative Bewertung durchgeführt. Diese orientiert sich an den empirischen Zusammenhängen aus [166]. Das dort beschriebene Antriebssystem mit 80 kW Nennleistung ähnelt der hier betrachteten Konfiguration. Um die Vergleichbarkeit mit den Zahlenwerten aus der Vorauslegung in 5.3 zu gewährleisten, werden die Werte auf die Ergebnisse aus [99] skaliert. Auf diesem Weg lässt sich eine prozentuale Kostenwirkung auf die Werte aus [99] bestimmen.

- Für die leichte Erhöhung des Verdichterleistungsbedarfs ist die Kostenwirkung sehr gering. Aus diesem Grund wird sie bei der Bewertung der Systemkosten in 5.3.3 im betrachteten Leistungs-

bereich konstant gehalten. Für die Höhenfahrt und erhöhte Luftvolumenströme bei niedriger Luftdichte kann man die Kostenerhöhung nach [166] auf 5 – 10 % schätzen. Der Kostenanteil am Gesamtsystem ist bei [166] für den Verdichter allgemein niedrig.

- Die leichte Erhöhung der maximalen Kühlsystemleistung ergibt nach [166] eine Kostenerhöhung unter 1 %.

Die Abschätzungen darf man aufgrund der empirischen Zusammenhänge nur als grobe Tendenzen ansehen.

7.7.2 Auswirkungen des Betriebs bei Wirkungsgradstrategie

Wird in der Versuchsmatrix die Auswahl der Betriebsstrategie konstant gehalten, zeigt sich deren Einfluss. Von besonderem Interesse sind eventuelle Vorteile im Bezug auf einen Betrieb des Zellstapels bei niedrigeren Stromdichten und hohem Wirkungsgrad.

7.7.2.1 Technische Auswirkungen

In der in 7.5.7.2 beschriebenen Betriebsstrategie wird eine Betriebspunktverschiebung zu höheren Wirkungsgraden durchgeführt, wenn eine ausreichende Leistungsreserve vorliegt. Ist dies nicht der Fall, wird eine höhere Stromdichte eingestellt. Daher wird der Zellstapel nicht dauerhaft auf einen Betrieb bei hohem Wirkungsgrad ausgelegt. Dies würde den Zellstapel vergrößern und Nachteile in Kosten und Bauraum verursachen. Für den Betrieb mit der Wirkungsgradstrategie für die gleiche Auslegung des Zellstapels zeigt sich:

- **Erforderliche Bruttoleistung:** Die maximale angeforderte Stapelleistung sinkt um 24,7 % im Vergleich zur einfachen Lastverteilung in den anderen Simulationen, in denen die Brennstoffzelle einen möglichst hohen Anteil der Bedarfsleistung übernimmt. Im Gegenzug wird die Batterie stärker belastet. Dabei muss natürlich beachtet werden, dass bei einem solchen Betrieb eine entsprechende Batteriekapazität vorgehalten werden muss. Der Gesamtwirkungsgrad verbessert sich aufgrund des hohen Batteriewirkungsgrads auch bei mehrfacher Spannungswandlung.
- **Erforderliche Verdichterleistung:** Die erforderliche Verdichterleistung sinkt um 22,3 %, da die Brennstoffzelle allgemein bei niedrigeren Leistungen betrieben wird.
- **Hochspannungs-Nebenverbraucher:** Die Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher sinkt um 22,6 %
- **Erforderliche Gasmassenströme:** Für die maximale Last sinkt der Wasserstoff-Massenstrom um 24,8 %, der Luftmassenstrom sinkt um 9,4 %.
- **Erforderliche Dampfmenge:** Die erforderliche Befeuchtung sinkt um 21,5 %
- **Erforderliche Zwischenkühlung:** Die Temperaturdifferenz zwischen Verdichteraustritt und Eingang des Zellstapels sinkt um 20,2 %
- **Abzuführende Reaktionswärme:** Die maximale Reaktionswärme sinkt um 25,1 %
- **Erforderlicher Kühlluftmassenstrom:** Der abgeschätzte Kühlluftmassenstrom für den Hochtemperaturkreislauf sinkt um 26,2 %

Alle beschriebenen Parameter sinken aufgrund des Betriebs der Brennstoffzelle bei geringeren Lasten. Es gibt also allgemein eine große Anzahl an Betriebspunkten, bei denen eine Betriebspunktverschiebung aufgrund ausreichend großer Leistungsreserven möglich ist. Die Batterieauslegung muss bei einem dauerhaften Verschiebebetrieb mit ausreichender Kapazität ausgelegt werden. In einer realen Umsetzung könnte die Batterie nicht dauerhaft die angeforderten Leistungen bereitstellen. An dem dargestellten Beispiel zeigt sich, dass ein parametrisches Modell auch eine Beurteilung von Betriebsstrategien erlaubt, obwohl erst ein dynamisches Modell eine genauere Auslegung erlaubt.

7.7.2.2 Kostenwirkung

Die Einflüsse der in 7.7.2.1 dargestellten Auswirkungen auf die Systemkosten können mit den empirischen Beziehungen aus [166] qualitativ abgeschätzt werden:

- Die Kosten des Zellstapels können mit den Werten aus [99] linear skaliert werden. Bezogen auf die Gesamtkostenschätzung aus 5.3.3 ergäbe sich durch die Reduktion der Stapelleistung eine Reduktion von 8,9 % der Systemkosten
- Der maximale Wasserstoffverbrauch wird durch die einfache Wirkungsgradstrategie um 20 % abgesenkt. Die Betriebskosten sind entsprechend reduziert

- Die verringerte Reaktionswärme senkt die Kosten des Kühlsystems nach [166] um 4,8 %. Skaliert auf das Gesamtsystem entspricht dies einer Kostenreduktion zwischen 0,3 % für die Gesamtsystemkosten nach [166] und 1,6 % für die Gesamtsystemkosten nach [99]
- Die verringerte Verdichterleistung und der verringerte Luftmassenstrom ermöglicht eine kleinere Auslegung und damit nach [166] eine Reduktion der Verdichterkosten um 4 %, was einer Systemkostenwirkung zwischen 0,4 % ([166]) und 0,7 % ([99]) entspricht
- Ein geringerer Verbrauch erlaubt eine Systemauslegung mit einem kleineren Tank. Nach den Daten in [168] verringert eine um 5 % verringerte Kapazität bei gleichbleibendem Druck die Tankkosten um 4,2 %

Die Kostenauswirkungen des Wirkungsgradbetriebs sind auch ohne verkleinerte Auslegung der Komponenten deutlich. Eine größere Auslegung des Zellstapels zum dauerhaften Betrieb bei günstigem Wirkungsgrad ist dagegen kontraproduktiv.

7.7.3 Auswirkungen einer Degradation des Zellstapels

Brennstoffzellen und Batterien verlieren im Lauf ihrer Lebensdauer einen Teil Ihrer Leistungsfähigkeit. Nach [169] und [170] kann man die Degradation als Wirkungsgradverlust definieren. Für einen Zellstapel in einer Automobilanwendung nennen sie eine Grenze von 10 % als zulässigen Wirkungsgradverlust am Ende der Lebensdauer. Um den Effekt dieser Veränderung auf die restlichen Systemanforderungen aufzuzeigen, kann das parametrische Systemmodell mit einem veränderten Zellkennfeld simuliert werden. In diesem sind die Zellspannung und damit die Leistungsfähigkeit um 10 % verringert.

7.7.3.1 Technische Auswirkungen

Damit nur ein Faktor variiert wird, werden die Ergebnisse mit der Simulation bei fester Stapelwahl verglichen. Es zeigen sich die folgenden technischen Auswirkungen:

- **Stellgrenze Brennstoffzelle:** Wie erwartet reduziert sich die Stellgrenze der Brennstoffzellenleistung um 10,6 %. Damit wird der Zellstapel in der Simulation korrekt dimensioniert
- **Wärmelast Hochtemperaturkreislauf:** Mit dem degradierten Zellstapel ergibt sich hier eine Reduktion um 6,3 %, die Reaktionswärme des Zellstapels sinkt um 7,2 %. Hierbei ist aber lediglich die verringerte Leistung durch die vereinfachte Modellierung mittels verringerter Zellspannung berücksichtigt. In der Realität würde ein verschlechterter Wirkungsgrad dazu führen, dass bei gleicher Leistungsanforderung, mehr Reaktionswärme abgeführt werden müsste.
- **Übertragungsfaktor Wandler BZ:** Bei Verwendung eines Brennstoffzellenwandlers steigt dessen Spannungsverhältnis am Maximalpunkt um 9,5 % auf ein Verhältnis von 2,9, mit einem Aussteuergrad (Duty Cycle) von 0,7. Dies ist nach [164] noch möglich. Entsprechend ergibt sich im Modell keine höhere Batterieanforderung, da die Brennstoffzellenleistung ausreichend ist.

7.7.3.2 Kostenwirkung

Die Degradation des Zellstapels hat durch die Wirkungsgradverluste negative Auswirkungen auf die Betriebskosten. Diese sind jedoch vernachlässigbar klein. Das Kühlsystem kann nicht kleiner ausgelegt werden, da der Betrieb bei voller Leistungsfähigkeit zu Beginn der Lebensdauer gewährleistet werden muss. Für die Leistungselektronik gilt die Anforderung der konstanten Leistung. Um auch bei verringerter Spannung die gleiche Leistung zu übertragen, muss der Spannungswandler höhere Ströme tragen. Die Halbleiter müssen darauf ausgelegt werden, was nach [165] Kosten- und Volumennachteile mit sich bringt.

7.7.4 Auswirkungen signifikant höherer Leistungsanforderungen

Anstatt die Auswirkungen eines Faktors bei bestehender Auslegung zu untersuchen, kann auch die Auslegung im Modell verändert werden. Als Beispiel lassen sich die Auswirkungen bei Verwendung eines deutlich leistungstärkeren Zellstapels bei gleichen Fahrleistungsanforderungen simulieren. Betrachtet wird hier ein System mit 180 kW Gesamtleistung. Bei konstantem Hybridisierungsgrad von 30 % ergibt sich damit eine Netto-Stapelleistung von 126 kW. Dies ist eine Vergrößerung gegenüber dem System mit 70 kW Nennleistung um 80 %. Es wird jedoch nicht berücksichtigt, dass man in einem solchen Fahrzeug eine größere Traktionsmaschine mit entsprechend verbesserten Fahrleistungen einsetzen würde.

7.7.4.1 Technische Auswirkungen

Für konstante Fahrleistungen zeigen sich folgende Einflüsse:

- **Erforderliche Bruttoleistung:** Die maximal angeforderte Bruttoleistung des Zellstapels erhöht sich um 40,3 %. Die Brennstoffzelle deckt jetzt also den vollständigen Fahrleistungsbedarf. Dabei liegen noch 40 % Leistungsreserve vor.
- **Angeforderte Leistungsverteilung:** Aufgrund der Größe des Brennstoffzellensystems kann die Fahrleistung vollständig von der Brennstoffzelle abgedeckt werden. Die Batterieleistung wird praktisch gar nicht mehr angefordert. Deren Maximalleistung bei maximaler Fahrenforderung ist um 34,3 % auf 17,9 kW reduziert.
- **Erforderliche Gasmassenströme:** Der Wasserstoffmassenstrom steigt am Maximum um 47,6 %, der Luftmassenstrom um 47,3 %

7.7.4.2 Kostenwirkung

Für den Brennstoffzellenstapel kann man die Kosten in etwa linear skalieren. Nach [99] ergibt sich für die von 70 kW um 80 % auf 126 kW erhöhte Nettogleistung auch ein um 80 % verteuertes System. Eine Gesamtkostenwirkung könnte hier durch eine Reduktion der Batteriekapazität erreicht werden. Für eine Reduktion der Kapazität von 2 kWh auf 0,8 kWh ergibt sich nach [100] eine Kostenreduktion für das Batteriesystem von 75 %. In einer dynamischen Simulation muss für einen solchen Fall die ausreichende dynamische Wirkung einer solch verkleinerten Batterie überprüft werden.

7.8 Erkenntnisse der Simulationen mit Parametervariation

Mit den durchgeführten Simulationen mit Parametervariationen wurden verschiedene Bereiche der modellbasierten Spezifikation untersucht. Die Erkenntnisse lassen sich drei Themenkomplexen zuordnen.

7.8.1 Methodikvalidierung

Als Teil der in dieser Arbeit betrachteten, modellbasierten Spezifikations- und Entwurfsmethodik wurde die Modellstruktur für eine physikalische Simulation aus der in SysML modellierten Funktionsarchitektur abgeleitet. Dabei wurden über geeignete Modellumwandlungen Strukturen erzeugt, die sich in Form physikalischer Wirkketten in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink abbilden lassen. Der Ansatz zur Parametervariation mit statistisch ausgewählten Lastgrößen erlaubt einen schnellen Überblick über die Wertebereiche einzelner Zielgrößen. Mit entsprechenden Werkzeugen lassen sich die berechneten Parameterwerte direkt in Parameterdiagrammen der SysML als erste Spezifikation erfassen, wodurch wiederum Dokumentationsaufwände verringert werden. Aufgrund der gleichen Strukturen in beschreibender Modellierung und Simulation ist die Konsistenz der Modelle gewährleistet.

7.8.2 Spezifikation physikalischer Parameter

Für alle in der Modellierung der Funktionsarchitektur identifizierten Parameter wurden in einer systematischen Parametervariation Wertebereiche für verschiedene Eingangslasten berechnet. Dabei wurden bekannte Daten der Brennstoffzellenstapel zugrunde gelegt, um im Entwicklungsablauf eine Spezifikation der Subsysteme zu ermöglichen. Die Ergebnisse lieferten folgende Erkenntnisse

- Die Dimensionierungen von Brennstoffzellen- und Batterieleistung, sind mit 70 kW und 30 kW ausreichend für die gewählten Leistungsanforderungen, die schon mit 90 kW Systemleistung voll abgedeckt werden. Der Hybridisierungsgrad ist mit 30 % gut gewählt, da die Batterieanforderung in der stationären Lastverteilung mit maximal 27,2 kW gering ist. Der Brennstoffzellenanteil an der Antriebsleistung ist demnach ausreichend groß.
- Für das Kühlsystem zeigt sich, dass keine hohen Spielräume für die Auslegung vorliegen. Die Kühlfläche im Fahrzeug, die mit 0,55 m² abgeschätzt wird, muss maximiert werden, um die entstehenden Wärmelasten von bis zu 41 kW (annähernd halbe Nennleistung) im Heißlandfall abführen zu können. Für Sonderfahrtsituationen muss eine Leistungsreduktion (Derating) des Antriebssystems definiert werden.
- Für die Versorgung mit Betriebsgasen ergeben sich Grenzwerte für die erforderlichen Massenströme. Für die maximale Leistungsanforderung ergeben sich Maximalanforderungen von 1,8 g/s H₂ und 68,9 g/s Luft. Mit diesen Aussagen lassen sich Teilsystemuntersuchungen starten, welche die Druckverhältnisse der Gasversorgung detailliert betrachten müssen. Die Auswirkungen der

Stöchiometrieverhältnisse und der Zellzahl aus der Spezifikation des Brennstoffzellenstapels wurden dargestellt.

- Für die elektrische Energieversorgung wurde untersucht, welche Übersetzungsverhältnisse die Spannungswandler bereitstellen müssen. Die Ergebnisse von maximal 2,5 (Brennstoffzellenwandler) und 1,35 (Batteriewandler) belegen die technische Machbarkeit, berücksichtigen aber nicht die Einflüsse der Rekuperation von Bremsenergie und damit eine mögliche Überschneidung der Spannungsverhältnisse von Batterie und Brennstoffzelle

7.8.3 Sensitivität auf Parametervariation

In einer Simulation von Szenarien wurden verschiedene Fälle untersucht, die in der Auslegung berücksichtigt werden können. Darüber hinaus erlaubt das Modell eine Variation der Umweltparameter. Eine starke Schwankung der Werteverteilung ist ein Beleg für die Sensitivität der Systemauslegung auf die Variation eines Faktors. Bei geringen Schwankungen ist die Parametrierung robuster.

- Die Szenarien Heißland und Höhenfahrt liefern Werte für erhöhte Verdichterleistung und Kühlleistungsbedarf. Außerdem ergibt sich eine Tendenz für erhöhten Befeuchtungsbedarf.
- Durch Kennfeldvariation lassen sich Zelldegradation oder vergrößerte Zellstapel schnell durchrechnen. Die Spezifikationen können entsprechend skaliert werden. Auswirkungen auf die Spannungsverhältnisse erlauben eine Spezifikation des Zellstapels, beziehungsweise eine Beschreibung der Spannungswandler am Lebensdauerende.
- Zur Variation der Betriebsstrategien wurde eine einfache Betriebsstrategie implementiert, die den Betriebspunkt der Brennstoffzelle zu niedrigeren Stromdichten verschiebt, soweit möglich. Es zeigen sich positive Auswirkungen in Verbrauch und Wärmelast. Die Untersuchung zeigt, dass auch mit einem Stationärmodell erste Vergleiche von Betriebsstrategien vorgenommen werden können.
- Auf Basis bekannter Kostenstudien lässt sich eine einfache Abschätzung der Kostenwirkung dieser Szenarien aufstellen.

7.8.4 Sensitivität auf Anforderungsänderung

Alle Parametervariationen werden für verschiedene Lastverteilungen durchgeführt. Damit kann dargestellt werden, wie sensibel eine Systemauslegung auf eine Absenkung der Anforderungen reagiert. Diese Information ist im Verlauf eines angemessenen Systementwurfs wertvoll. Sie erlaubt eine Abschätzung der Auswirkungen, wenn keine Kombination von Maximalauslegungen betrachtet wird, sondern ein „90 %-System“.

- Die erforderliche Motorleistung und das erforderliche Drehmoment sind erwartungsgemäß sehr sensibel auf eine Reduktion der Lastanforderungen.
- Wasserstoff- und Luftförderung zeigen nur geringe Veränderungen für kleinere Lastverteilungen. Eine Auslegung dieser Komponenten auf die Maximalfälle ist daher sinnvoll.
- Die Kühlungssituation zeigt eine deutliche Sensitivität auf eine Reduktion der Lastanforderungen. Betriebsstrategien mit „Derating“ sind also wirkungsvoll.

7.9 Zusammenfassung

In der physikalischen Sicht der modellbasierten Entwurfsmethodik werden numerische Wertebereiche für die in der Funktionsarchitektur dargestellten Interface-Parameter bestimmt. Um die Schwankungsbreiten dieser Parameter zu bestimmen und die Grundlage für nachfolgende Subsystementwicklungen zu legen, wurde ein physikalisches Modell aufgebaut mit dem eine systematische Parametervariation durchgeführt wurde. Die Modellstruktur wurde mit Strukturmodellen der SysML vollständig aus der zuvor definierten Systemarchitektur abgeleitet.

Die elektrische Bedarfsleistung als zentrale Anforderungsgröße an das System wurde aus statistisch ausgewählten Fahrzyklen bestimmt. Dabei wurden stets die volle Abdeckung der Anforderungen als auch reduzierte Bedarfsleistungen betrachtet. Damit wurde für alle technischen Parameter im Sinne einer Sensitivitätsanalyse aufgezeigt, welchen Einfluss eine Reduktion der Lastanforderungen auf die Schwankungsbreite des Parameters hat. Mit dieser Information können die Auswirkungen gesenkter Anforderungen auf die technischen Auslegungen und Komponentenkosten überprüft werden. Durch Simulation von Szenarien mit veränderten Klimadaten, Betriebsstrategien oder Systemkonfigurationen lassen sich technische Auswirkungen aufzeigen und die Spezifikationen anpassen. Die berechneten Parameterintervalle bilden die Grundlage für die Spezifikation der Subsysteme.

8 Ablaufsicht: Definition des Systemverhaltens

8.1 Einleitung

Ein zentraler Vorteil der modellbasierten Arbeitsweise in frühen Phasen der Systementwicklung ist die gemeinsame Modellierung von Anforderungen, Funktionen und Verhalten des Systems. Ein Verhaltensmodell beschreibt Reaktionen des Systems als Antwort auf diskrete Ereignisse oder bestimmte Zustände. Die erste Beschreibung dieser Art liefern die in den Anwendungsfällen (Use-Cases) definierten Event-Ketten. Auf der Basis der Use-Case-Modellierung werden in Folge logische Abläufe definiert, die diese Event-Ketten detaillieren und deren spätere Realisierung in Form einer Steuerlogik sicherstellen.

Wie schon in der Vorauslegung und in der Funktionsanalyse, wird eine Gliederung in Betriebsarten verwendet um den Umfang einzelner Analysen zu reduzieren. In diesem Kapitel wird die Verhaltensmodellierung mit Aktivitätsdiagrammen der SysML für das Beispiel des Startablaufs durchgeführt und beschrieben. Das resultierende Aktivitätsnetzwerk wird anschließend in einer Ablaufplanung auf die Einhaltung zeitlicher Anforderungen überprüft. Den Abschluss bildet die Überführung in ein SysML-Sequenzdiagramm. Dieses dient als Grundlage für die Identifikation von Zuständen einzelner Subsysteme zur Ableitung der Steuerlogik.

8.2 Von der Use-Case-Definition zur Ablauflogik

Die Grundlage für den Entwurf der logischen Systemabläufe ist das Use-Case-Modell aus der Anforderungsanalyse. Die nachfolgend durchzuführenden Arbeitsschritte zeigt Abbildung 130:

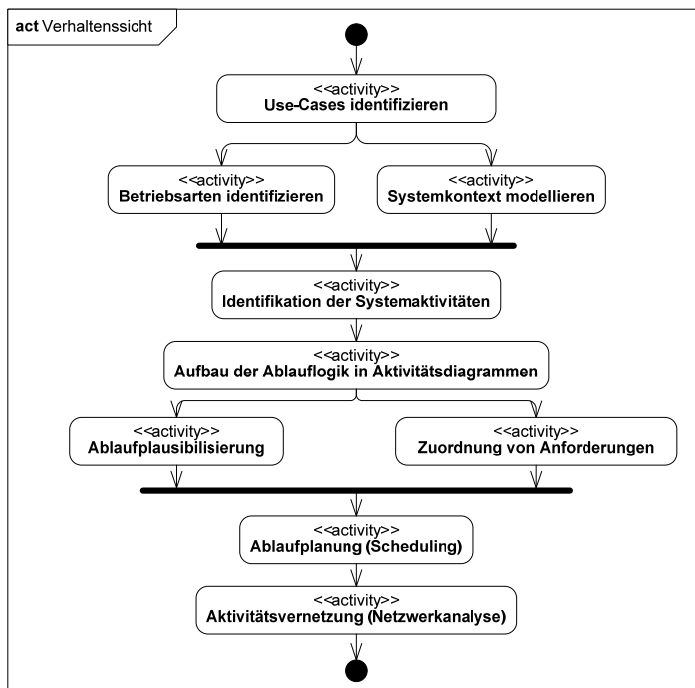


Abbildung 130: Arbeitsfluss der Teilmethodik für die Verhaltenssicht

Der erste Schritt der hier beschriebenen Verhaltensmodellierung ist die Identifikation der Systemaktivitäten und die anschließende Anordnung in Aktivitätsdiagrammen. Eine Aktivität ist in diesem Zusammenhang eine Aktion, die aus mehreren elementaren Aktionen zusammengesetzt ist [19]. Nach [19] sind Aktivitätsdiagramme immer dann geeignet, wenn Abläufe beschrieben werden. Dies können Prozesse, Algorithmen oder sonstige Operationen sein. Die Grundlagen der Verhaltensmodellierung in Aktivitäts- und Zustandsmodellen sind in 2.6.4 beschrieben. Durch die hier definierten Systemaktivitäten werden Elemente von Abläufen und Steuerlogiken beschrieben. Es gilt Def. 10:

Definition: Eine Systemaktivität beschreibt ein Aktionselement zur Beschreibung der Ablaufkette eines Use-Cases. Die Aktivitäten greifen auf eine beliebige Anzahl physikalischer oder logischer Aktionen oder Funktionen zurück. Sie werden im System durch Zustandsautomaten oder Funktionssoftware implementiert.

Def. 10

Die Verwendung des Aktivitätsbegriffs ist vergleichbar mit der Zerlegungsstruktur in [82]. Dort wird die Eventkette aus den Use-Cases in Aktivitäten zerlegt. Diese werden weiter zu Funktionen detailliert. Für die hier beschriebene Anwendung gelten die in Abbildung 131 dargestellten Wirkbeziehungen. Funktionen realisieren die Aktivitäten, die Aktivitäten realisieren den Ablauf des Use-Cases. Es kann aber keine eindeutige Zuweisung von Funktionen erfolgen, da einzelne Funktionen zur Realisierung mehrerer Aktivitäten verwendet werden können.

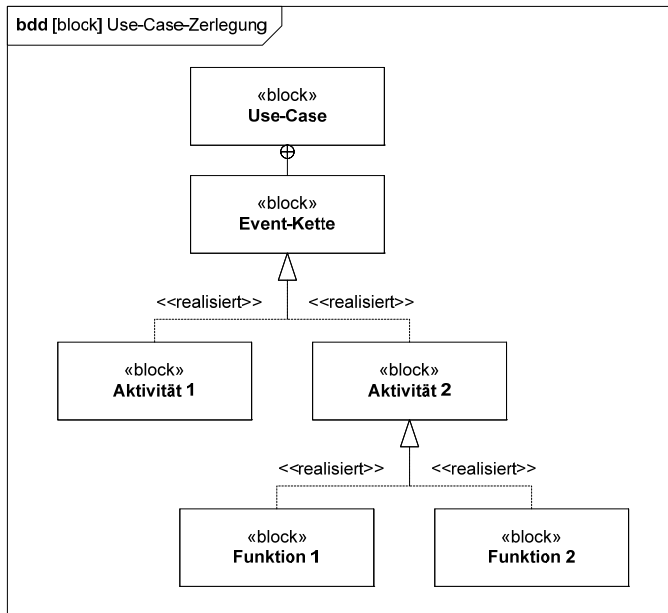


Abbildung 131: Zusammenhang zwischen Funktionen, Aktivitäten und den Use-Cases

Diese Beziehungsstruktur kann wie in 6.3 dargestellt, bei der Untersuchung der Funktionsarchitektur ausgewertet werden. Die Verwendung von Aktivitätsdiagrammen zur Modellierung der Use-Case-Abläufe wird auch in anderen Ansätzen aus der Literatur verwendet. In [171] wird der Zusammenhang von Use-Case-Modellen und Aktivitätsdiagrammen beschrieben. Dabei wird besonders hervorgehoben, dass Aktivitätsdiagramme verwendet werden können um mehrere Use-Cases zu verbinden oder komplexe Use-Case-Abläufe zu modellieren. Aktivitäten können nach [171] außerdem im Aktivitätsdiagramm verschiedenen Akteuren im System zugeordnet werden. In [75] werden Aktivitätsdiagramme verwendet um Testszenarien zu definieren. Jeder Aktivität werden dabei eine Beschreibung und ein erwartetes Resultat zugeordnet. Außerdem werden den Aktivitäten Anforderungen zugeordnet. Für die hier angestrebte Verhaltensmodellierung zur Identifikation einer Steuerlogik ergeben sich damit die folgenden Aufgaben, mit denen die Entwurfsschritte aus Abbildung 130 realisiert werden können. Dabei wird die Gliederung des Gesamtsystems in Betriebsarten verwendet.

- Systemaktivitäten für jede Betriebsart definieren
- Modellierung der Ablaufdiagramme für jede Betriebsart
- Den Systemaktivitäten werden Randbedingungen aus der Anforderungsanalyse zugeordnet. Auf dieser Basis können beispielsweise zeitliche Randbedingungen, Umschaltbedingungen oder Energiebudgets in den Entwurf der Steuerlogiken einbezogen werden
- Netzwerkanalyse und Konsistenzprüfung der Aktivitäten für alle Use-Cases einer Betriebsart
- Weitere Modellierung als Sequenzdiagramme als Basis für die Zustandsidentifikation und damit den Entwurf der steuernden Zustandsautomaten

In diesem Kapitel wird der Modellierungsprozess für das Anwendungsbeispiel anhand des Startablaufs dargestellt. Dieses Beispiel wurde ausgewählt, da er einen kritischen Use-Case des Brennstoffzellensystems darstellt. An diesem Beispiel lässt sich auch eine zeitliche Ablaufplanung (Scheduling-Analyse) demonstrieren. Die Basis für die Untersuchung ist die Beschreibung des Start-Use-Cases, die in Tabelle 17 dargestellt ist:

Name	Start
Akteur	Fahrer
Eventkette	1. Fahrer öffnet Fahrzeug oder selbstständige Öffnung (Keyless Entry) 2. Fahrer betätigt die Bremse (optional) 3. Fahrer betätigt Systemaktivierung (Klemme15) und löst Hochlauf (Klemme50) aus 4. System fährt hoch 5. System meldet Betriebsbereitschaft 6. System meldet eingeschränkte Fahrfreigabe 7. System meldet Fahrfreigabe
Vorbedingung	Fahrzeug ist geschlossen. Antriebssystem ist inaktiv
Nachbedingung	Diagnostetests bestanden; kein Wasserstoff detektiert; Fahrfreigabe erteilt; Antriebssystem für definierten Betriebsbereich freigegeben

Tabelle 17: Use-Case „Start“ aus der Systemanalyse des Brennstoffzellensystems

Andere zur Betriebsart „Start“ gehörige Use-Cases detaillieren einzelne Bereiche dieser Eventkette. So gilt beispielsweise für die Startvorbereitung der Ablauf in Tabelle 18:

Eventkette	1. Fahrer öffnet Fahrzeug oder selbstständige Öffnung (Keyless Entry) 2. System führt passive Startvorbereitung durch (z.B. Diagnose, Test Startbedingungen, Wasserstoffdetektion, Hochlauf Steuergeräte) 3. System gibt aktive Startvorbereitung nach erfolgreicher Systemprüfung frei 4. Fahrer betätigt Systemaktivierung (Klemme15) 5. System führt aktive Startvorbereitung durch (z.B. Aktivierung Bordnetz, Gaseversorgung und Kühlsystem) 6. System gibt Systemhochlauf nach erfolgreicher Aktivierung frei
-------------------	--

Tabelle 18: Eventkette des Use-Case „Startvorbereitung“

Auf der Basis der Eventketten aller Start-Use-Cases werden im ersten Modellierungsschritt die Systemaktivitäten definiert.

8.2.1 Identifikation der Systemaktivitäten

Die Definition der Aktivitäten wird separat für jeden Use-Case der betrachteten Betriebsart durchgeführt. Die Aktivitäten lassen sich als SysML-Blockdiagramm hierarchisch unter einem Package-Diagramm für die Use-Cases anordnen. Abbildung 132 zeigt die Paketzurordnung der Use-Cases, die zur Betriebsart „Start“ gehören:

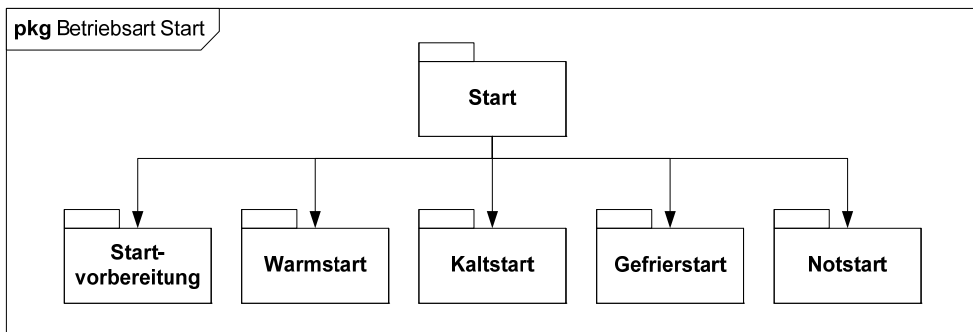


Abbildung 132: Zugehörige Pakete der Betriebsart „Start“

In dem hier verwendeten Modellierungswerkzeug „Topcased“ [172] kann jetzt in jedem Paket ein Blockdiagramm angelegt werden, das alle Aktivitäten der Use-Case-Eventkette darstellt. Dies ist nur eine der vielfältigen Möglichkeiten diese Sammlung im Modell abzubilden. Um Konsistenzprobleme zu vermeiden werden alle Aktivitätszerlegungen direkt in der Modellumgebung aufgebaut und keine zusätzliche Dokumentation, wie etwa Listen, aufgebaut. Ein Beispiel der identifizierten Aktivitäten zeigt Abbildung 133 für den Use-Case „Kaltstart“:

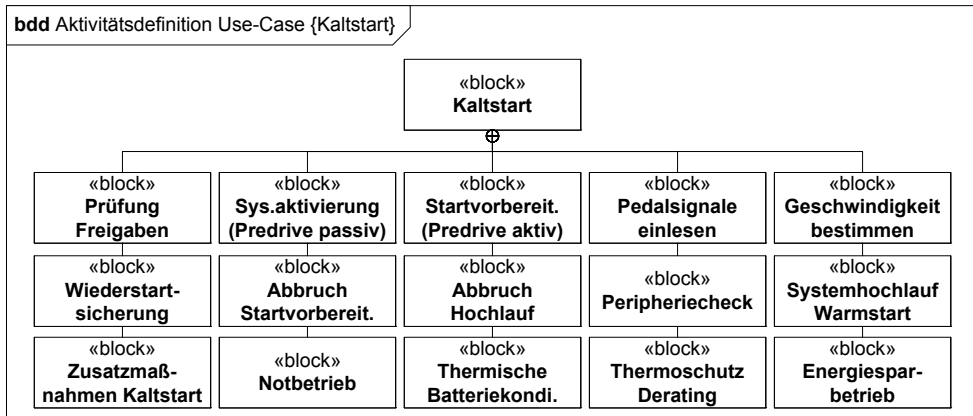


Abbildung 133: Aktivitätszerlegung des Use-Case „Kaltstart“

In der Zerlegung in Abbildung 133 sind zahlreiche funktionale Elemente enthalten, die konkrete technische Abläufe beschreiben. Einige ergeben sich direkt aus der Use-Case-Beschreibung, andere werden in nachfolgenden Modellierungsschritten identifiziert und das Modell entsprechend ergänzt. An dieser Stelle zeigt sich deutlich, dass hier iterative Vorgänge stattfinden, die sich nicht in einen streng sequenziellen Ablauf einbinden lassen. Die identifizierten Aktivitäten sind im Einzelnen:

- **Systemaktivierung (Predrive passive):** Passive Startvorbereitung aus der Use-Case-Definition. Enthält z.B. Diagnose, Test der Startbedingungen (Temperatur), Wasserstoffdetektion, Hochlauf Steuergeräte
- **Startvorbereitung (Predrive active):** Aktive Startvorbereitung aus der Use-Case-Definition. Enthält z.B. Aktivierung des Bordnetzes, der Gasversorgung und des Kühlsystems
- **Systemhochlauf Warmstart:** Der eigentliche Startablauf
- **Zusatzmaßnahmen Kaltstart:** Zusatzmaßnahmen in Abhängigkeit von Temperaturschwellen. Dies können für Brennstoffzellensystem beispielsweise Heiz- oder Trocknungsvorgänge sein
- **Thermische Batterieconditionierung:** Temperierung des Batteriesystems, z.B. durch Zuheizung
- **Thermoschutz Derating:** Betrieb mit Leistungsbegrenzung aufgrund von zu kalten Komponenten
- **Energiesparbetrieb:** Möglicher „Leerlauf“-Zustand für Start-Stop-Vorgänge
- **Notbetrieb:** Beschleunigter Startvorgang, ausgelöst durch bestimmte Kriterien

- **Prüfung Freigaben:** Koordinierende Systemfunktionen der Steuerung, die prüfen, ob die jeweiligen Freigaben vorliegen
- **Pedalsignale bestimmen/Geschwindigkeit bestimmen:** Erheben von Daten, die für die Steuerlogik verwendet werden. Z.B. fordert der Use-Case „Start“ ein gedrücktes Bremspedal für die Startfreigabe
- **Abbruch Startvorbereitung/Abbruch Hochlauf:** Aktivität aus Startabbruch-Szenarien. Hier müssen Abschaltvorgänge beschrieben werden (dies wird hier nicht näher betrachtet)
- **Wiederstartsicherung:** Maßnahmen zur Sicherung der Wiederstartfähigkeit nach einem Startabbruch. Dies können für Brennstoffzellen beispielsweise Trocknungsvorgänge oder die Wasserstoffanreicherung im Zellstapel sein. Für Batterien kann eine Anhebung des Ladestands notwendig sein.

Nach der Identifikation der notwendigen Systemaktivitäten werden die Verhaltensmodelle in Form von Aktivitätsdiagrammen erstellt.

8.2.2 Aufbau der Verhaltensmodelle als Aktivitätsdiagramme

Die Aktivitätsdiagramme werden nach dem in 2.6.4 beschriebenen Schema aufgebaut. Dabei werden Start- und Endzustand der Use-Cases übernommen. Dazwischen werden die zuvor identifizierten Aktivitäten angeordnet. Für die Analysen, die hier angestrebt werden, müssen die folgenden Elemente modelliert werden:

- Prozeduraler Ablauf der Systemaktivitäten
- Trigger und Bedingungsabfragen
- Anforderungen, insbesondere Zeitrandsbedingungen für die Ablaufplanung

Die Logik der Modellerstellung folgt dem Ablauf in Abbildung 134:

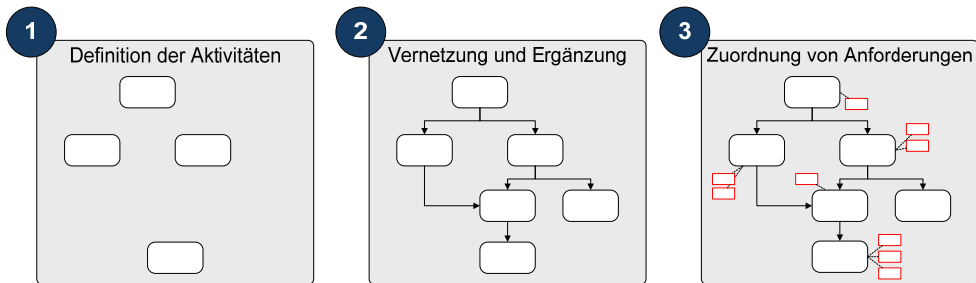


Abbildung 134: Modellierungsablauf für das Verhaltensmodell

Nach der in 8.2.1 beschriebenen Definition der Systemaktivitäten werden diese angeordnet und mit Verbindungen versehen. Die Verbindungen werden mit Bedingungen und Datenflusselementen angereichert. Danach werden Anforderungen (Randbedingungen) aus dem Systemlastenheft zugeordnet. Das Ergebnis für den Use-Case "Start" ist in Abbildung 135 dargestellt. Die Aktivitätselemente sind gelb hervorgehoben. Zugeordnete Randbedingungen sind rot dargestellt.

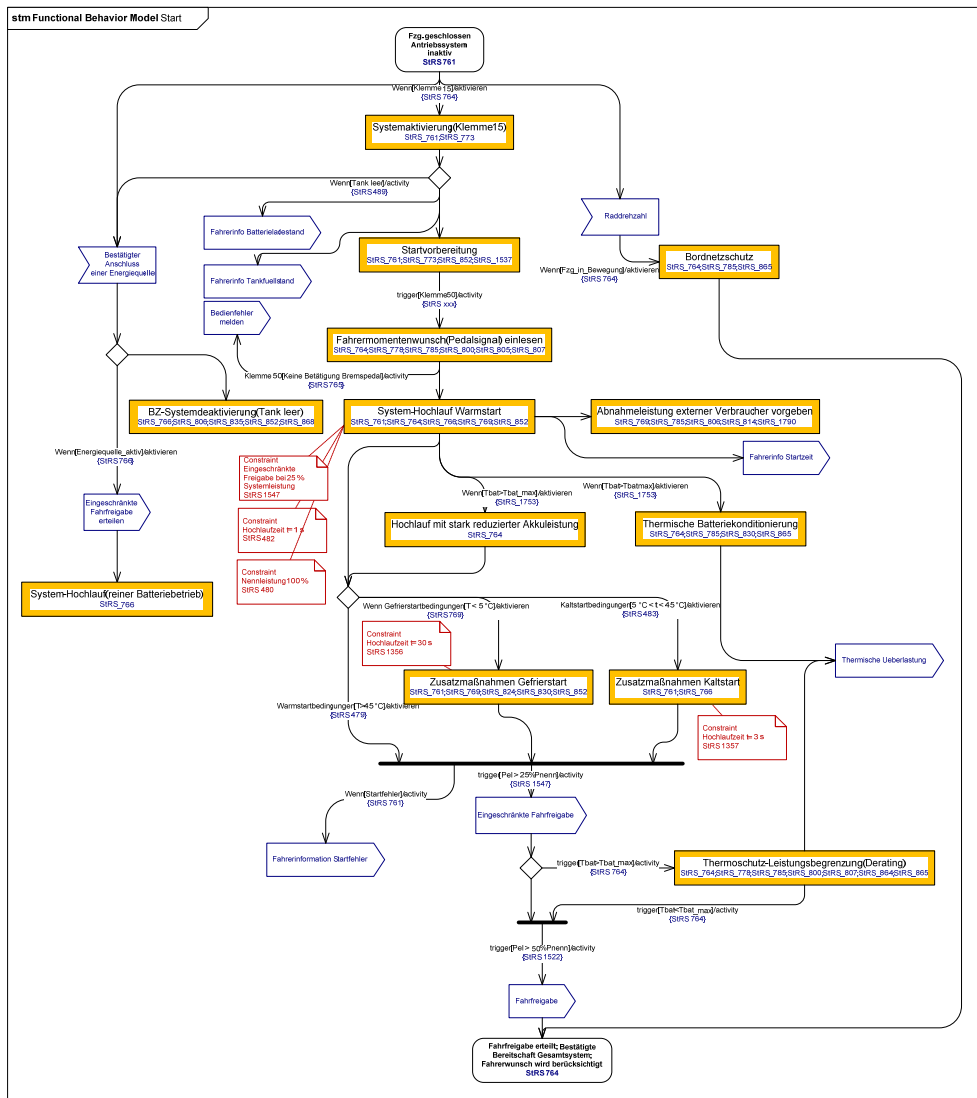


Abbildung 135: Verhaltensmodell für den Use-Case Start

Für das gesamte Brennstoffzellensystem wurden auf diese Art und Weise elf Verhaltensmodelle mit insgesamt 81 Aktivitäten aufgebaut. Die graphische Modellierung ist ein sehr nützliches Werkzeug, da Inkonsistenzen bei der Anforderungsdefinition erkannt werden, wenn ein prozeduraler Ablauf erstellt werden muss. Anforderungen, die Trigger und Umschaltkriterien betreffen, werden ebenfalls plausibilisiert. Durch die Einbindung einzelner Elemente an die Anforderungsdatenbank ist außerdem die Nachverfolgbarkeit der Anforderungen gewährleistet.

8.3 Ablaufplanung und Netzwerkanalyse

Neben dem Nutzen als Analysewerkzeug dienen die Verhaltensmodelle auch als Grundlage für den Entwurf der Steuerungslogik. Dazu wird im folgenden Schritt eine Ablaufanalyse (Scheduling-Analyse) des Aktivitätsnetzwerks für das Start-Beispiel durchgeführt. Neben zeitlichen Randbedingungen können auch andere Anforderungen in geeigneten Modellen untersucht werden.

8.3.1 Aufbau des Aktivitätsnetzwerks

Genauso wie in der Funktionszerlegung in 6.2 werden bei der Verhaltensmodellierung reduzierte Modelle erstellt, die nicht das Gesamtsystem betrachten, sondern einzelne Abläufe. Um nach der Ablaufmodellierung einzelner Use-Cases die Aktivitätsnetzwerke ganzer Betriebsarten oder sogar des Gesamtsystems zu analysieren, müssen die Aktivitätselemente aus den Verhaltensmodellen geeignet vernetzt werden. Analog zum Funktionsnetzwerk aus 6.2.4 handelt es sich bei den Verhaltensmodellen um Graphen, dessen Knoten (die Aktivitätselemente) und Kanten (die Übergänge zwischen den Aktivitäten mit Zusatzeigenschaften, wie Schwellwerten oder Dateneingängen) in einer Netzwerkanalyse bearbeitet werden können. Um diese Analysen zu ermöglichen wurde eine Werkzeugkette aufgebaut, die die graphischen Modelle untersucht und einen Graphen erzeugt. Dieser Graph kann dann, wie in Abbildung 136 dargestellt, einer Ablaufanalyse zugeführt werden.

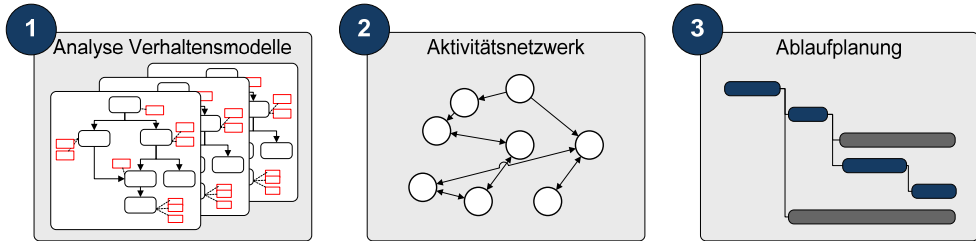


Abbildung 136: Werkzeugkette zur Analyse der Verhaltensmodelle

Die Analyse der Verhaltensmodelle arbeitet nach dem Prinzip einer Breitensuche [173]. Mit einem solchen Algorithmus wird innerhalb einer Ebene eines Graphen jeder Knoten der Reihe nach geprüft, bis ein gesuchter Knoten gefunden wird. In den graphischen Verhaltensmodellen wird ein Knoten erfasst und mit allen Meta-Daten (Vorgänger-Knoten, Nachfolger-Knoten, Anforderungen, Anforderungsnummer, Trigger) in eine Liste geschrieben. Dieser Vorgang wird wiederholt bis alle Knoten erfasst wurden. Die Datenliste wird direkt an Matlab übergeben, wo der Graph visualisiert und weiter verarbeitet werden kann. Den Graphen für das hier betrachtete Startbeispiel zeigt Abbildung 137:

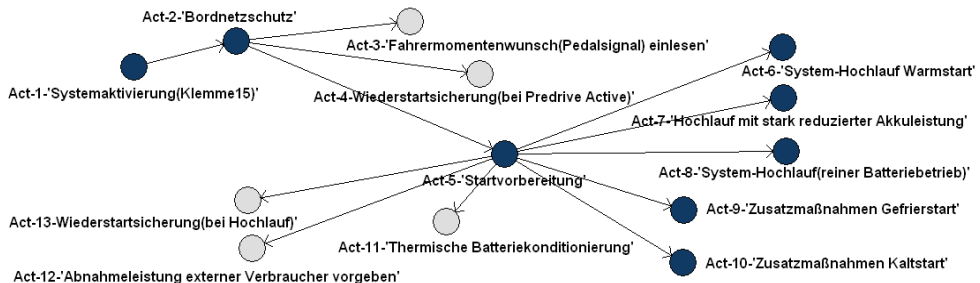


Abbildung 137: Graph der Aktivitäten für Start-Use-Case (graue Knoten = permanente Aktivitäten)

Für die Visualisierung und die anschließende Ablaufplanung wird die TORSCHÉ-Scheduling-Toolbox verwendet [174]. Der Graph in Abbildung 137 enthält die wesentlichen Aktivitäten, die auch im Aktivitätsdiagramm in Abbildung 135 und in der Beschreibung in 8.2.1 enthalten sind. Mit der Analyse der Verhaltensmodelle und dem Aufbau eines Netzwerks lässt sich eine Verbindung zwischen den Use-Cases herstellen. Wie bereits geschildert ist dies nach [171] einer der zentralen Vorteile der Aktivitätsdiagramme, der sich aber erst durch die automatisierte Auswertung nutzen lässt. Allein für den Startfall können auf diese Art und Weise mehrere Aktivitätsdiagramme zu einem einzigen Aktivitätsnetzwerk zusammengefasst werden. Analog zur Zusammenfassung der Funktionsbäume bei der physikalischen Funktionsanalyse in 6.2 wird aus reduzierten Verhaltensbetrachtungen dadurch wieder eine Gesamtsystembetrachtung. Die Netzwerkanalyse kann daraufhin eingesetzt werden, um fehlende Verbindungen oder falsche Endknoten zu identifizieren. Ebenso können Widersprüche zwischen Übergangskriterien aufgedeckt werden. Fehlende Verbindungen zwischen Knoten liefern einen Hinweis auf eine fehlende Übergangsbedingung in der Anforderungsanalyse. Falsche Endknoten deuten auf fehlende Aktivitäten hin, die iterativ ergänzt werden können. Widersprüche zwischen einzelnen Use-Case-Definitionen können aufgelöst werden. Für die Stammaktivitäten des Startfalls wird

nachfolgend eine Ablaufplanung erstellt. Dabei werden der Einfachheit halber nicht alle Startszenarios berücksichtigt.

8.3.2 Ablaufplanung für den Start-Use-Case

Die Ablaufplanung steht beispielhaft für die Analyse von Randbedingungen, die den Aktivitäten im Verhaltensmodell zugeordnet werden. Andere Randbedingungen können Temperaturgrenzen, Energiebudgets oder Ähnliches sein. Die Anwendung dieser Randbedingungen aus dem Lastenheft auf physikalische und logische Untersuchungen am vorliegenden Aktivitätsnetzwerk ist eine konkrete Maßnahme des "Requirements Engineering" für das Brennstoffzellensystem. Als Teil der hier beschriebenen Entwurfsmethodik müssen Anforderungen an geeigneten Modellen iterativ entwickelt werden. Zeitliche Randbedingungen sind für den Startablauf von besonderer Bedeutung. Außerdem bietet es sich an, die bisher durchgeführte Verarbeitung zu nutzen und das Aktivitätsnetzwerk einer automatisierten Ablaufplanung unter Nutzung von Scheduling-Algorithmen zuzuführen.

Vor der Ablaufuntersuchung müssen Anforderungen als Randbedingungen für den Startablauf definiert werden. Auf dieser Basis können dann technische Annahmen bewertet werden. Nach der Anforderungsanalyse in 4 gilt hier:

- Als Definition für die Startzeit gilt der Zeitraum zwischen der Startauslösung durch den Fahrer und der Fahrfreigabe durch das System (eingeschränkte Fahrfreigabe)
- Das Fahrzeug muss bei -20 °C innerhalb von 30 Sekunden 50 % seiner Nennleistung erreichen (entspricht DOE-Anforderung aus [175]). Als Gefrierstart werden Temperaturen $< 5\text{ °C}$ definiert
- Das Fahrzeug muss bei Kaltstart (Temperaturen $> 5\text{ °C}$) innerhalb von 3 s die Fahrfreigabe erreichen
- Das Fahrzeug muss bei warmem System (volllastfähig) innerhalb von 1 s die Fahrfreigabe erreichen
- Der Energieverbrauch beim Start darf nur so hoch sein, dass die Wiederstartfähigkeit nach einem Startabbruch gewährleistet ist (kein Energiebudget, wie in [175])

Für die zeitliche Anordnung der Aktivitäten des Graphen aus Abbildung 137 und die Analyse der genannten Anforderungen müssen Abhängigkeiten der Aktivitäten und Durchlaufzeiten angegeben werden. Die Abhängigkeiten sind durch die Kanten des Graphen vorgegeben. Für die Durchlaufzeiten werden basierend auf einem Referenzsystem und Erfahrungswerten, Annahmen für die Durchlaufzeit hinterlegt. Diese können später in physikalischen Untersuchungen oder in Tests überprüft werden. Für die Untersuchung des Start-Beispiels werden die folgenden Annahmen verwendet:

Phase "Predrive Passive"

- **Systemaktivierung (Klemme 15):** Fahrzeug-Steuergerät wird an 12V-Netz angeschlossen. Hochfahren des Steuergeräts wird mit 0,15 s abgeschätzt
- **Bordnetzschutz:** Darunter fällt die Vorladung und Überwachung des Bordnetzes und das Aktivieren von Verbrauchern. Wird mit 0,2 s abgeschätzt.

Phase "Predrive Active"

- **Fahrermomentenwunsch einlesen:** Kontinuierlicher Vorgang
- **Startvorbereitung:** Prüfung der Peripherie und Aktivierung der Kühlmittelpumpe. Wird mit 0,5 s abgeschätzt
- **Wiederstartsicherung:** Zur Wiederstartsicherung gehört das Sichern eines ausreichend hohen Batterieladestands SOC (State of charge). Im Normalfall erfolgt nur die Prüfung ob der SOC hoch genug ist. Dies wird mit 0,01 s abgeschätzt.

Phase "Hochlauf"

- **System-Hochlauf (reiner Batteriebetrieb):** Für reinen Batteriebetrieb müssen lediglich die Batterieschütze angeschlossen werden. Dafür werden 0,5 s angenommen
- **System-Hochlauf (Warmstart):** Für den konventionellen Hochlaufvorgang wird hier mit einem Erfahrungswert von 6,5 s nach [176] gerechnet. Dieser betrifft das Starten der Anoden-, Kathoden- und Kühlkreisläufe
- **System-Hochlauf (reduzierte Akkuleistung):** Gleiche Annahme wie beim konventionellen Warmstart

- **Zusatzmaßnahmen Kaltstart/Gefrierstart:** In der Aktivität "Zusatzmaßnahmen" werden Ablaufanteile für Kalt- oder Gefrierstarts zusammengefasst. Die Durchlaufzeit dieser Aktivität ist abhängig von den Umgebungsbedingungen. Nach [176] wird eine Zieltemperatur des Zellstapels von 55 °C definiert. Um den Zeitraum bis zum Erreichen dieser Temperatur können verschiedene Maßnahmen verwendet werden. Dazu zählen Kühlmittelzuheizer oder das Zuschalten von Lastsenken für Stromabfuhr und Eigenaufwärmung des Zellstapels. Darüber hinaus muss das Einfrieren des Produktwassers verhindert werden. Dazu kann beispielsweise der Luftmassenstrom erhöht werden.
- **Thermische Batterieconditionierung:** In dieser Aktivität sind Heizmaßnahmen für das Batteriesystem angeordnet, z.B. ein Kühlmittelzuheizer. Für die Batterie wird, wie in der physikalischen Modellierung in 7.5.4 eine Zieltemperatur von 35 °C angenommen.
- **Wiederstartsicherung:** Diese Aktivität ist Teil der Abschaltstrategie. Sie betrifft die Anhebung des Batterieladestands und das Aufheizen des Zellstapels, damit kein Produktwasser zurück bleibt.

Die geschilderten Prozessschritte haben im Wesentlichen noch unbekannte Durchlaufzeiten. Mit den bekannten Randbedingungen und den Anforderungen für die gesamte Durchlaufzeit lassen sich jedoch Grenzwerte für die Durchlaufzeiten einzelner Aktivitäten bestimmen. Eine solche Untersuchung muss physikalische Betrachtungen einschließen. Nach der Anordnung kann festgelegt werden, welche Prozessschritte parallelisiert werden können und wo die größten Potentiale für eine Zeiteinsparung liegen. Es geht hier also weniger um eine Verteilung von Operationen auf begrenzte Ressourcen, sondern um die geeignete Parallelisierung von Aktivitäten und die Definition von Grenzwerten für Ihre Durchlaufzeiten. Für das reduzierte Netzwerk mit den Start-Aktivitäten ergibt sich unter Verwendung der Torsche-Toolbox [174] das in Abbildung 138 dargestellte Ergebnis.

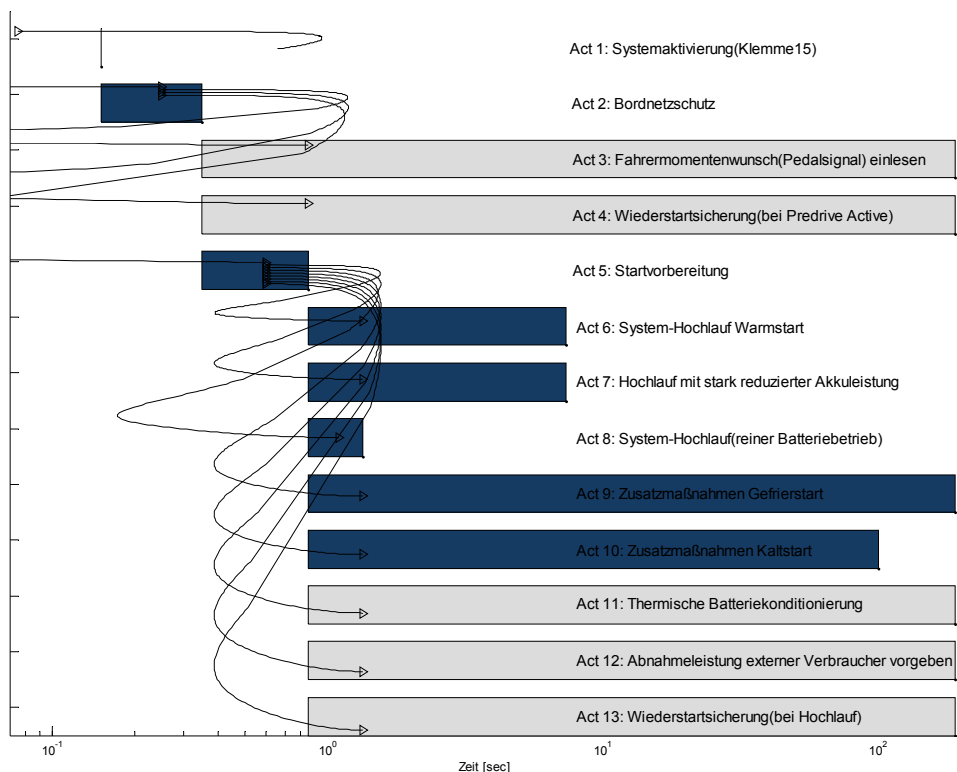


Abbildung 138: Zeitliche Anordnung der Start-Aktivitäten basierend auf dem SysML-Verhaltensmodell

In Abbildung 138 ist zur übersichtlicheren Darstellung eine logarithmische Skala dargestellt. Viele der im Start-Use-Case enthaltenen Aktivitäten laufen parallel und erfordern keine aufwändige Ablaufplanung. Die Zusatzmaßnahmen für den Gefrierstart stellen in dieser Darstellung den kritischen Pfad

dar. Die hier verwendeten Schätzwerte für die Durchlaufzeit sind Ergebnisse aus der weiteren Untersuchung. Diese müssen im Zusammenhang mit der Steuerlogik und der Implementierung in Form eines Zustandsautomaten untersucht werden. An dieser Stelle zeigt sich also wieder eine Querverbindung in die anderen Entwurfssichten, die sich nur iterativ auflösen lässt.

Die Ablaufanalyse zeigt, wie sich mit der beschriebenen Methodik und der entsprechenden Werkzeugkette direkte Netzwerkanalysen aus den Verhaltensmodellen ableiten lassen. Der resultierende Zeitrahmen wird im folgenden Kapitel als Grundlage für eine Startuntersuchung mit der zu entwerfenden Steuerlogik herangezogen. Die Überleitung zum Entwurf der Zustandsautomaten liefert die Zustandsidentifikation, die durch Modellumwandlungen direkt aus den Verhaltensmodellen hergeleitet wird.

8.3.3 Zustandsidentifikation für den Start-Use-Case

Nach der Festlegung der Ablaufsequenz im vorangegangenen Arbeitsschritt ermöglicht die Systemmodellierung in der SysML-Notation einen geordneten Entwurf der sequenziellen Kontrolllogik. Diese wird in digitalen Systemen in Form von Zustandsautomaten beschrieben. Bevor diese Zustandsautomaten im nächsten Kapitel entworfen werden, müssen die relevanten Systemzustände identifiziert werden. Dazu kann man die bisher gewonnenen Informationen der sequenziellen Reihenfolge und der Ablauflogik der Aktivitäten nutzen. Dazu werden diese in einem SysML-Sequenzdiagramm modelliert, wie es in 2.6.5.3 beschrieben wird.

Während ein Aktivitätsdiagramm den logischen Fluss eines einzelnen Use-Cases abbildet, können in einem Sequenzdiagramm Interaktionen zwischen Systemteilen in ihrem zeitlichen Ablauf dargestellt werden. Diese Systemteile sind im hier betrachteten Beispiel die in der Funktionsanalyse definierten Subsysteme. Damit ergibt sich der Modellierungsablauf, der schematisch in Abbildung 139 dargestellt ist:

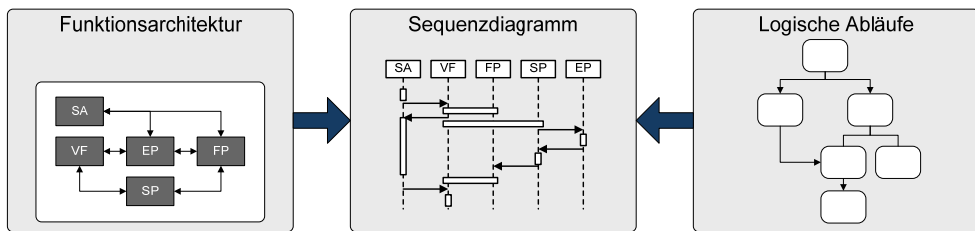


Abbildung 139: Erstellung des Sequenzdiagramms aus Subsystemstruktur und logischen Abläufen

Im Sequenzdiagramm wird eine Lebenslinie für jedes Subsystem dargestellt. Die Aktivitäten werden in der hier durchgeführten Modellierung nach dem Vorbild in [19] als Balken ("reference"-Blöcke) über mehreren Subsystemen dargestellt. Dadurch wird aufgezeigt, welches Subsystem an der Durchführung einer Aktivität beteiligt ist. Auf die Darstellung der Pfeile, die Datenfluss oder Aufrufe repräsentieren wird der Übersichtlichkeit halber weitgehend verzichtet. Einen Ausschnitt des Sequenzdiagramms zeigt Abbildung 140:

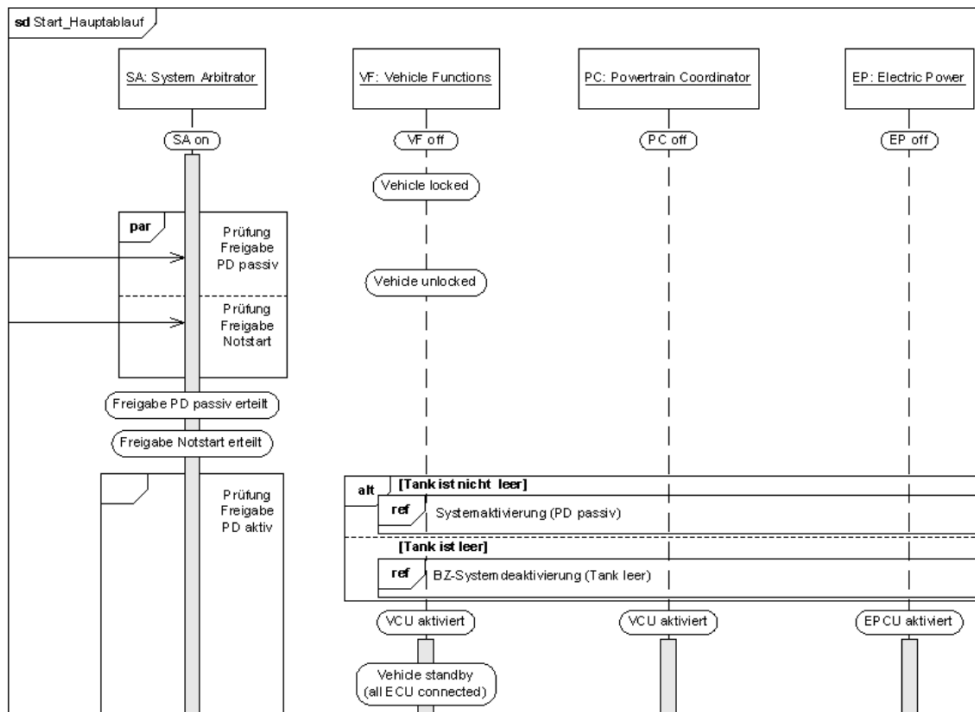


Abbildung 140: Ausschnitt aus dem Sequenzdiagramm für den Haupt-Startfall (siehe auch 16.6)

Das gesamte Modell für den Start-Use-Case ist in 16.6 abgebildet. Abbildung 140 zeigt vier Subsysteme aus der Funktionsanalyse in 6.5. Die Aktivitäten als logische Elemente sind als Rechtecke mit den entsprechenden Aufrufen dargestellt. Vor und hinter den Aktivitäten sind für alle Subsysteme Zustände definiert.

Durch diese Art der Modellierung ist demnach der Übergang von der logischen Ablaufstruktur eines Use-Case zur sequenziellen Steuerlogik für einzelne Subsysteme geschaffen. Dieser Arbeitsschritt wird mit der Zustandsidentifikation für alle Subsysteme abgeschlossen. Dazu wird vor und nach jeder Aktivität ein entsprechender Subsystemzustand auf die Lebenslinie des Subsystems eingefügt. Wie daraus die Zustandsautomaten für die Systemsteuerung abgeleitet werden, wird im folgenden Kapitel erläutert.

Die Verhaltensmodellierung zeigt, wie eng verflochten die einzelnen Modellsichten der Funktionen, der Abläufe und der Zustände sind. Die Pflege in einer einzigen Modellierungsumgebung erlaubt die Konsistenz zwischen den einzelnen Modellen zu wahren. Die Bearbeitung erfolgt im Regelfall in iterativen Wechsels zwischen den Modellsichten.

8.4 Zusammenfassung

In der dargestellten Verhaltensmodellierung werden logische Systemabläufe auf der Basis von Use-Cases aus der Anforderungsanalyse modelliert. Mit Hilfe der Verhaltensmodellierung wird eine Kernaufgabe der Systementwicklung, der gemeinsame Entwurf von Struktur, Funktion und Verhalten, erfüllt. Die erstellten Modelle liefern eine Reihe von Ergebnissen für den Konzeptentwurf:

- Konsistenzanalyse der in den Use-Cases geforderten Abläufe und Bedingungen
- Analyse der Randbedingungen, die den Aktivitäten zugeordnet werden
- Grundlage für den Entwurf einer sequenziellen Steuerlogik in Zustandsmaschinen

Auf Basis der Use-Cases wird für jede Betriebsart ein Aktivitätsdiagramm erstellt. Zur Konsistenzanalyse werden die Aktivitätselemente in diesen Diagrammen ausgelesen, vernetzt und in eine Graph-Struktur überführt, die in Matlab ausgewertet werden kann.

Auf der Basis des so angelegten Aktivitätsnetzwerks wird für das Beispiel des Start-Use-Case eine Ablaufplanung durchgeführt. Dazu werden relevante Anforderungen und dazugehörige technische Annahmen definiert. Die Ablaufanalyse liefert einen kritischen Pfad und Grenzwerte für die Durchlaufzeit einzelner Aktivitäten. Diese können bei späteren Simulationsuntersuchungen im Verbund mit Steuerlogiken getestet werden.

Um den Entwurf der Steuerlogik in Form von Zustandsautomaten aus der Verhaltensmodellierung abzuleiten werden die Aktivitätsdiagramme in Sequenzdiagramme überführt. Darin lassen sich Abläufe auf einzelne Subsysteme eingrenzen und relevante Systemzustände identifizieren. Die Verhaltensmodellierung ist damit ein zentrales Bindeglied zwischen Use-Cases, Funktionsarchitektur und der späteren Implementierung der sequenziellen Steuerung.

9 Zustandssicht: Entwurf der Steuerlogik

9.1 Einleitung

Nach der Verhaltensmodellierung der Systemabläufe in Aktivitäts- und Sequenzdiagrammen, muss die sequenzielle Steuerlogik, die diesem Verhalten zugrunde liegt, definiert werden. Diese soll in Form von Zustandsautomaten modelliert werden, die das Systemverhalten mittels Zuständen und den Übergängen zwischen diesen Zuständen abbilden. Aus den Zustandsautomaten können einerseits mit graphischen Programmierungswerkzeugen Anteile der Steuersoftware generiert werden. Andererseits kann man sie einsetzen um modellbasierte Tests des Systemverhaltens in der Simulation aufzubauen oder sogar Testfälle für das Realsystem zu erzeugen. In diesem Kapitel wird dargelegt, wie sich eine Beschreibung der Zustandsautomaten als Teil der modellbasierten Entwurfsmethodik direkt aus den Sequenzdiagrammen herleiten lässt. Für alle relevanten Subsysteme werden lokale Anteile der Steuerungslogik modelliert und Zustände und Umschaltkriterien definiert. Um die Korrektheit des Entwurfs zu überprüfen, wird ein Prototyp in „Stateflow“ implementiert und für das hier betrachtete Anwendungsbeispiel Szenarien des Systemkaltstarts in einer physikalischen Simulation untersucht.

9.2 Von der Ablauflogik zur Zustandsbeschreibung

Um die Analyse der logischen Abläufe aus der Verhaltensmodellierung in den Entwurf eines Zustandsautomaten zu überführen, muss die Information aus dem Sequenzdiagramm aus 8.3.3 genutzt werden. Den Ablauf der Zustandsmodellierung zeigt Abbildung 141:

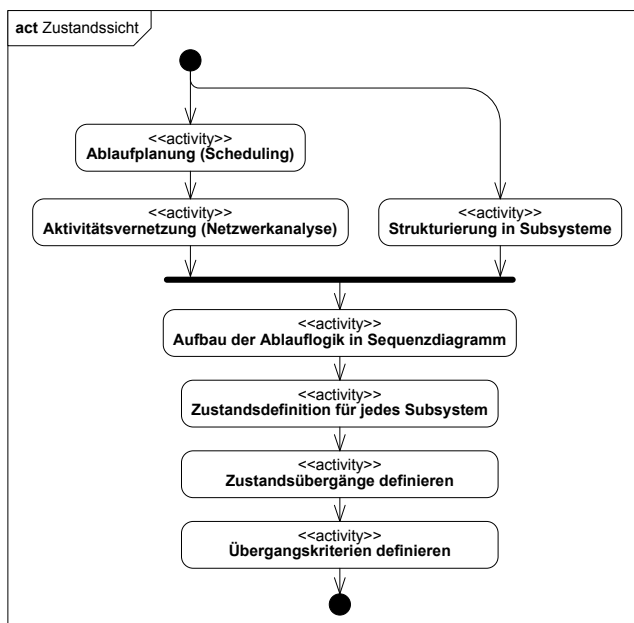


Abbildung 141: Arbeitsfluss der Teilmethodik für die Verhaltenssicht

Es wird deutlich, dass die Zustandsmodellierung sehr stark mit der Modellierung der Ablauflogik verflochten ist. Beide Modelle gehören zu den Verhaltensbeschreibungen und ergänzen sich gegenseitig. Das Zustandsmodell dient jedoch nicht der Prozessbeschreibung einzelner Use-Cases, wie dies bei der bisherigen Verhaltensmodellierung der Fall ist. Nach [58] werden Zustandsautomaten verwendet um die Reaktionen eines Systemteils auf bestimmte Ereignisse oder Stimuli zu beschreiben. Mit geeigneten Werkzeugen lässt sich aus der graphischen Modellierung ausführbarer Code generieren, der direkt im Zielsystem verwendet werden kann. Die Zustandsmodellierung ist demnach entweder ein Validierungswerkzeug oder ein direkter Teil der Implementierung. In Fahrzeuganwendungen werden Zustandsautomaten in den verschiedensten Anwendungen eingesetzt, beispielsweise um zwischen Betriebsarten umzuschalten oder um eine Startsequenz mit einer vordefinierten Schrittfolge auszuführen. In [177] wird ein Zustandsautomat verwendet um in einem Brennstoffzellensystem zwischen

verschiedenen Regelmodi umzuschalten. Eine Zustandsmaschine, die den Startprozess eines elektronischen Steuergeräts steuert und zwischen Zuständen wie „Run“ oder „Startup“ wechselt, beschreibt [178]. Ein Beispiel für eine Anwendung als Steuerlogik in einem Brennstoffzellensystem zeigt [179], wo ein Zustandsautomat verwendet wird um Start- oder Stopp-Sequenzen durchzuführen und auf Fehlerfälle zu reagieren.

9.2.1 Entwurfskonzept

Für die Zustandssicht der modellbasierten Entwicklungsmethodik soll dargestellt werden, wie sich die Zustandsautomaten aus den Analysen der Ablaufsicht herleiten lassen. Die Steuerungslogik kann auf zwei prinzipielle Arten implementiert werden:

- Zentraler, übergeordneter Zustandsautomat
- Lokal verteilte Zustandsautomaten, die über einen Koordinator verbunden sind

Für das Anwendungsbeispiel des elektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzellen soll für jedes Subsystem ein lokaler Zustandsautomat definiert werden, anstatt eines zentralen Zustandsautomaten aufzubauen. Diese Vorgehensweise hat nach [180] folgende Vorteile:

- Die einzelnen Systemanteile sind austauschbar und einer Wartung leichter zugänglich
- Ein zentraler Zustandsautomat muss Zustandsdaten aus allen Subsystemen empfangen um seine Steuerbefehle auszugeben. Dadurch werden die Schnittstellen komplex. Bei lokal untergebrachten Zustandsautomaten entstehen zwar Redundanzen, da die gleichen Fahrzustände an mehreren Stellen erkannt werden müssen. Die Komplexität der Schnittstellen wird aber reduziert
- In einem zentralen Zustandsautomaten vervielfachen sich die Zustände, da sie mehrfach innerhalb jeder möglichen Zustandskombination implementiert werden müssen. Die lokale Anordnung reduziert die Anzahl der Zustände

Neben den genannten Vorteilen gliedert sich diese Entwurfsvariante gut in die in dieser Arbeit entwickelte Entwurfsmethodik, da in der Verhaltensmodellierung bereits Zustände für die einzelnen Subsysteme definiert wurden. Darüber hinaus wurde beim Entwurf der Funktionsarchitektur in 6.5 bereits ein Subsystem „Systemarbitrierer“ angelegt. In diesem Block lässt sich die Koordination der lokal verteilten Zustandsautomaten unterbringen.

9.2.2 Vorgehensweise und Entwurfsmuster für das Antriebssystem

Zum Aufbau der Zustandsautomaten werden die Zustände für jedes Subsystem mit Hilfe des Sequenzdiagramms in 16.6 identifiziert. Nach der Definition der Zustände lassen sich Übergänge ableiten. Die Übergangsbedingungen müssen auf der Basis vorhandener Systemanforderungen erstellt oder neu definiert werden. Für die Implementierung wird ein Entwurfsmuster in Form einer Anzahl wiederkehrender Zustände festgelegt. Diese entsprechen Phasen des Fahrzeugbetriebs und wurden bereits im Rahmen der Aktivitätsmodelle eingeführt:

- **Off:** System ausgeschaltet
- **Predrive passive:** Passiver Vorlauf / **Predrive active:** Aktiver Vorlauf
- **Warmstart / Kaltstart / Gefrierstart:** Startabläufe mit jeweiligen Zusatzmaßnahmen
- **Derating:** Betrieb bei reduzierter Leistung
- **Drive:** Fahrbetrieb

Die Implementierung gliedert sich, wie in allen andern Modellierungsschritten auch, in Betriebsarten. Unter Verwendung dieser Grundstruktur werden im folgenden Abschnitt beispielhaft die Zustandsautomaten für den Startablauf definiert.

9.3 Entwurf der Zustandsautomaten

Für die Steuersequenz des Brennstoffzellensystems (Subsystem FP: First Power Source) gelten die bereits in den Aktivitätsdiagrammen festgelegten Phasen nach dem oben genannte Entwurfsmuster. Abbildung 142 zeigt das daraus resultierende Zustandsmodell. Die Grundlagen der Zustandsdiagramme werden in 2.6.5.3 erläutert.

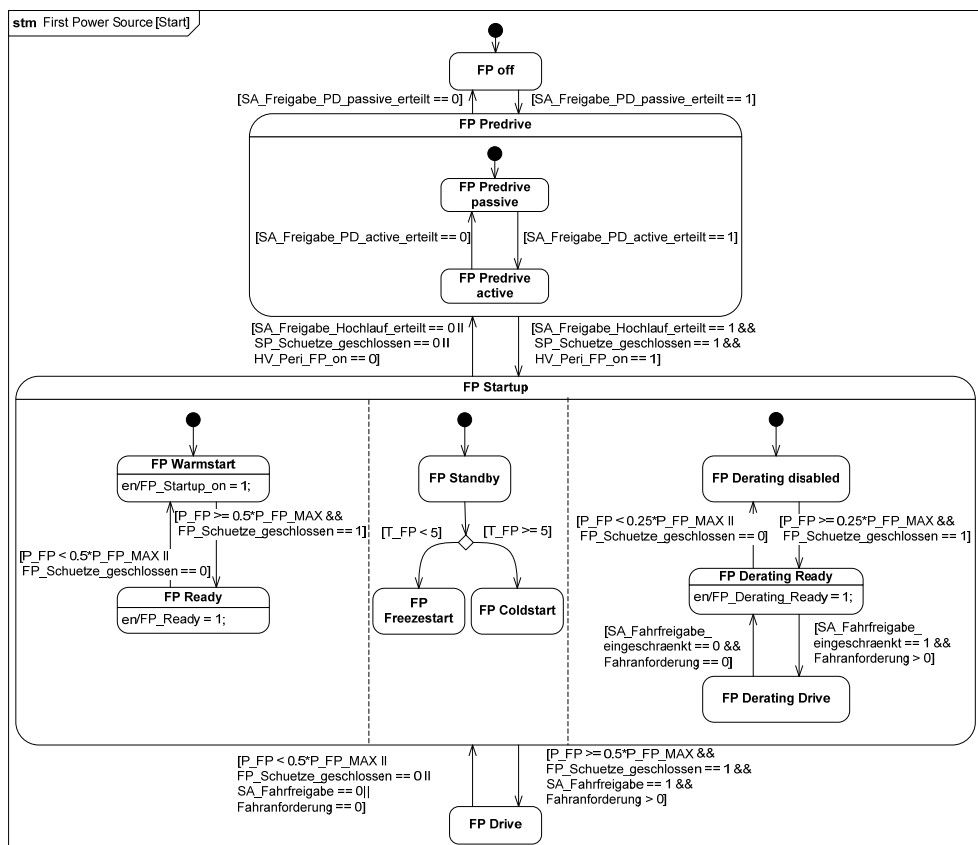


Abbildung 142: Zustandsmodell für das Brennstoffzellensystem (Startsequenz, Subsystem FP: First Power Source)

Für den Startbetrieb werden drei parallele Automaten innerhalb des Startzustands angeordnet. Die normale Startsteuerung für den Warmstartfall ist im Zustand „FP-Warmstart“ angesiedelt. Daneben stehen die Zustände „FP-Coldstart“ und „FP-Freezestart“. Diese lösen Zusatzmaßnahmen, wie Betriebspunktverschiebungen oder Betrieb des Startzuheizers aus. Als Gefrierstart gilt ein Betrieb unterhalb 5 °C. Durch die Parallelität können diese Zusatzmaßnahmen auch weiterlaufen, wenn der normale Startablauf bereits beendet ist (Zustand „FP-ready“). Im rechten Teil wird ein Betrieb mit reduzierter Leistung (Derating) aktiviert. Durch diesen Zustand wird eine Leistungsabgabe des Brennstoffzellensystems ermöglicht, sobald die Leistung des Zellstapels in Abhängigkeit der Zelltemperatur 25 % seiner Nennleistung erreicht und die Trennschütze des Brennstoffzellensystems geschlossen sind. Sobald 50 % der Nennleistung erreicht werden, ist das Subsystem FP in Bereitschaft. Bei einer Fahranforderung schaltet der Zustandsautomat in den Zustand „FP-Drive“ des Fahrbetriebs. Die gleiche Grundstruktur gilt auch für den Zustandsautomaten des Batteriesystems in Abbildung 143:

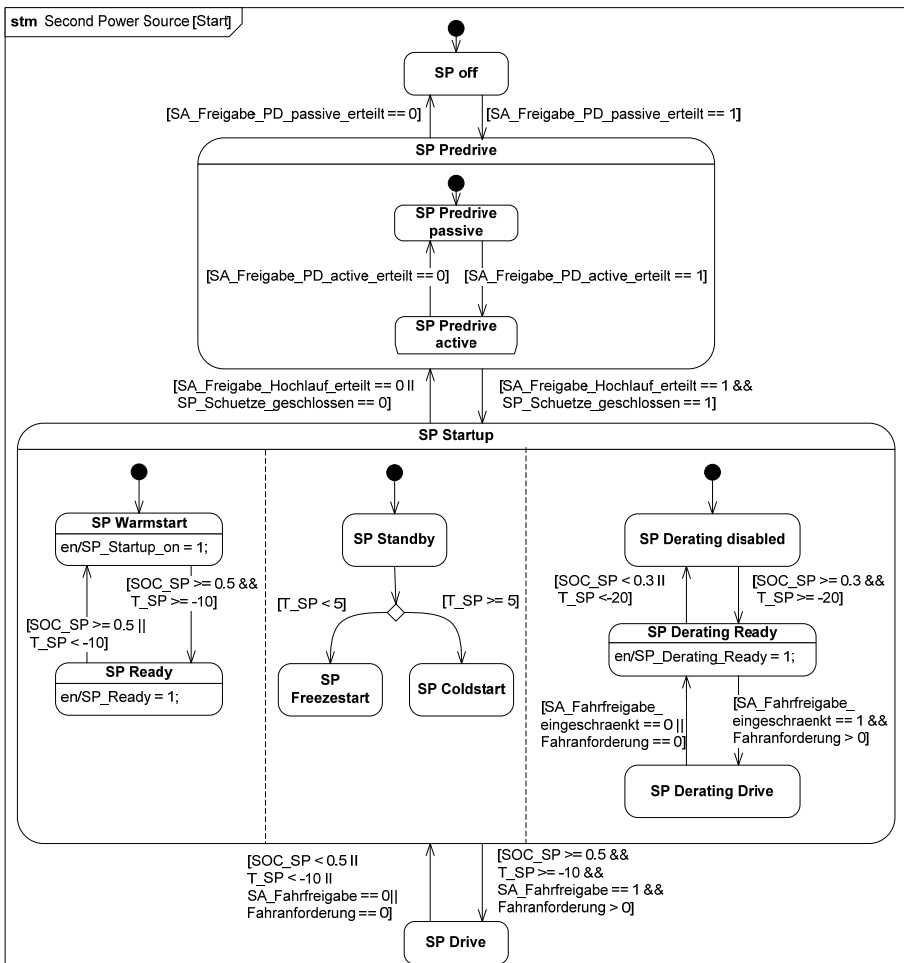


Abbildung 143: Zustandsmodell für das Batteriesystem (Startsequenz, Subsystem Second Power Source)

Im Unterschied zum Brennstoffzellensystem gilt hier für die Freigabe des eingeschränkten Betriebs eine zusätzliche Abhängigkeit vom Ladestand. Der eingeschränkte Betrieb wird oberhalb einer Ladung von 30 % und einer Batterietemperatur von -20 °C aktiviert. Die volle Freigabe der Batterie erfolgt bei -10 °C. Diese Grenzwerte gelten für den Entladebetrieb und sind identisch mit den Darstellungen in [181]. Durch den dargestellten Entwurf ist es beiden Energiewandlern unabhängig voneinander möglich, eine eingeschränkte Fahrbereitschaft zu erreichen. Durch diese Parallelisierung wird der gesamte Startablauf beschleunigt. Die Erkennung der Zustände muss jedes Subsystem unabhängig voneinander durchführen. Dadurch entstehen Schnittstellen mit geringem Datenfluss von Subsystem zu Subsystem und die Systeme sind leicht austauschbar. Die zentralen Freigabekommandos müssen von einem externen Arbitrierer vergeben werden. Diese Funktionalität wird im Subsystem „SA: System Arbitrator“ untergebracht. Den Entwurf zeigt Abbildung 144:

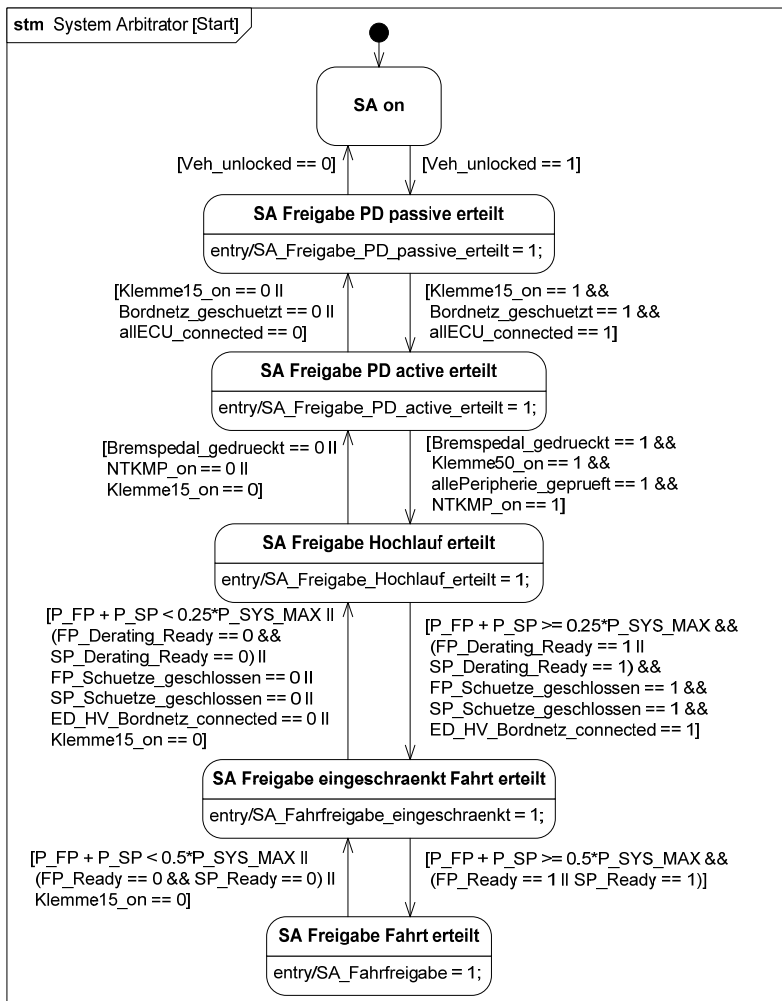


Abbildung 144: Zustandsmodell für den Systemarbitrierer (Startsequenz, Subsystem SA: System Arbitrator; NTKMP: Niedertemperaturkühlmittelpumpe; ED: Electric Drive; SP: Second Power Source; HV: High Voltage)

Die umfangreichen Übergangskriterien werden iterativ durch die Analyse der Anforderungen und die Simulation des Systemverhaltens, das im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird, definiert. Der Arbitrierer vergibt die Freigaben für die Vorlaufphasen „Predrive passive“ und „Predrive active“ auf Basis der zuvor modellierten Sequenzen und deren Anordnung in der Scheduling-Analyse. Bei Öffnung des Türschlosses (Veh_unlocked) wird der passive Vorlauf gestartet. Bei aktivierten Steuergeräten (allECU_connected) und Betätigung des Startkontakts (Klemme15) wird der aktive Vorlauf gestartet. Der Hochlauf wird freigegeben, wenn die Niedertemperaturkühlmittelpumpe (NTKMP) läuft, der Peripherietest abgeschlossen ist und der Zündschlüssel betätigt wird (Klemme50). Für die Fahrfreigaben prüft der Arbitrierer die Bereitschaftszustände der anderen Subsystem (Ready) und die verfügbare Systemleistung. Bei 25 % der Nennleistung erfolgt die eingeschränkte Fahrfreigabe, bei 50 % die volle Fahrfreigabe. Die gesamte Startsequenz kann auch rückwärts durchlaufen und jederzeit abgebrochen werden.

Für das hier dargestellte Anwendungsbeispiel werden nur diese drei Zustandsautomaten modelliert und anschließend implementiert, da sich die Struktur in den weiteren Systemteilen weitgehend ähnelt. Die dargestellten Beispiele repräsentieren lediglich die Betriebsart „Start“. Für andere Betriebsarten

werden weitere Steuersequenzen mit zusätzlichen Zuständen definiert. Diese werden im weiteren Verlauf mit den bereits ausgearbeiteten Anteilen integriert.

9.4 Verhaltenssimulation für den Systemstart

Nach der Modellierung der Zustandsautomaten ist es möglich, das dadurch definierte reaktive Systemverhalten zu testen. Dies wird in diesem Abschnitt für den Ablauf des Kaltstarts demonstriert. Dazu wird eine rein modellbasierte Validierung in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink durchgeführt. Das Ziel ist eine Bestätigung, dass die Systemreaktionen den geforderten Abläufen der Use-Cases entsprechen. Außerdem sollen die Ablaufplanung und die Zeitrandbedingungen für den Startablauf überprüft werden.

Die Zustandsnotation erlaubt auch weitere Anwendungen, wie z.B. eine direkte Codegenerierung mit geeigneten Werkzeugen sowie frühe, modellbasierte Tests. In [182] wird eine Anwendung beschrieben, in der Code für ein Fahrzeugsystem erzeugt wird. Fehlersuche und -korrektur werden vor der Code-Erzeugung am Modell der Zustandsmaschine vorgenommen. In [183] wird eine Zustandsmaschine verwendet, um verschiedene Betriebszustände einer Komponente zu simulieren und im Verbund mit realer Hardware zu testen. Die hier beschriebene Überprüfung erfolgt jedoch nur in der Simulation.

Zur Modellierung des Kaltstarts müssen die drei beschriebenen Zustandsautomaten implementiert werden. Dazu wird die Matlab-Toolbox „Stateflow“ verwendet. Für das physikalische System wird ein Aufheizmodell genutzt, welches das Temperaturverhalten und die Leistungsabgabe von Brennstoffzelle und Batterie simuliert. Abbildung 145 zeigt die gesamte Struktur des implementierten Modells zur Verhaltensvalidierung:

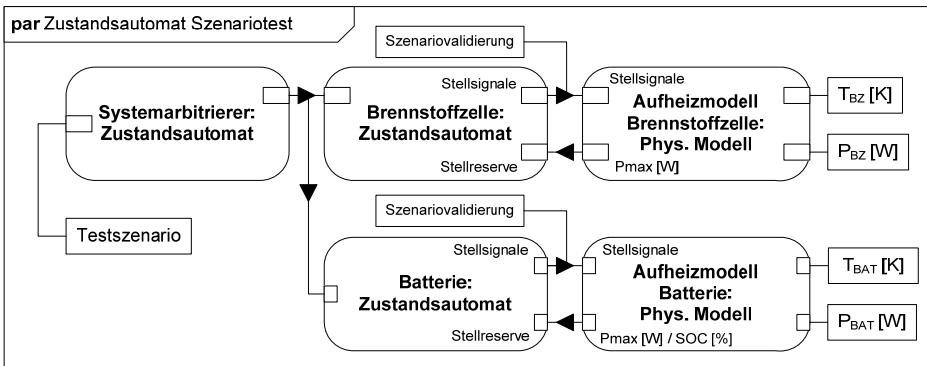


Abbildung 145: Modellstruktur für die Verhaltenssimulation

Mit der gezeigten Struktur ist es sowohl möglich den Entwurf des Zustandsautomaten zu testen, als auch das physikalische Verhalten mit den vorher definierten Anforderungen zu vergleichen. Dadurch wird die Lücke zwischen der logischen Ablaufdefinition und der physikalischen Spezifikation geschlossen.

9.4.1 Implementierung der Zustandsautomaten in Stateflow

Mit „Stateflow“ lassen sich hierarchische Zustandsautomaten in Diagrammform implementieren und in physikalische Simulationsmodelle der Simulationsumgebung „Simulink“ einbetten. Die Steuerlogik der drei beschriebenen Subsysteme wurde nach den Vorgaben in Abbildung 142, Abbildung 143 und Abbildung 144 implementiert. Eingangssignale aus der Fahrzeugumgebung (Klemme15, ECUs angeschlossen, Kühlmittelpumpe gestartet, etc.) werden in Form eines Start szenarios als konstante Signalverläufe abgebildet. Dieses Start szenario dient, wie in Abbildung 145 dargestellt, als Stimulus des Systemarbitrierers. Eine Darstellung der Testsignale zeigt 16.8.

9.4.2 Aufheizmodell des hybridisierten Brennstoffzellensystems

Um den Startablauf in einer integrierten Co-Simulation aus diskreten Zustandsautomaten und kontinuierlicher, physikalischer Modellierung zu untersuchen, muss ein Modell des physikalischen Aufheizvorgangs mit einem diskreten Modell der Startstrategie für das hybridisierte Brennstoffzellen-

system kombiniert werden. Das Modell basiert auf den Untersuchungen in [184]. Um ein Hybridsystem abzubilden, wird ein zusätzliches Aufheizmodell der Batterie eingebunden, wie in Abbildung 145 dargestellt. Die Aufheizmodelle sind nach der Struktur in Abbildung 146 aufgebaut.

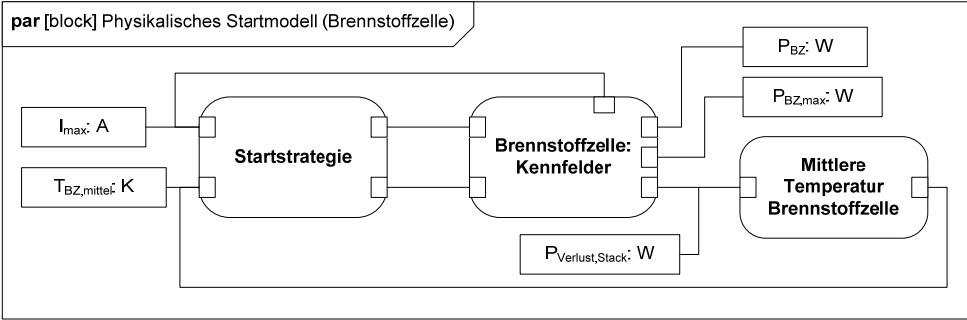


Abbildung 146: Modellstruktur des Aufheizmodells für den Brennstoffzellenstapel

Die elektrischen Kenndaten des Brennstoffzellenstapels werden im Gegensatz zu [184] mit detaillierten Kennfeldern abgebildet. Dabei werden die gleichen Kennfelder, wie in der restlichen Systemspezifikation in 7.5.2.1 verwendet. Als Betriebspunkt der Brennstoffzelle wird eine minimale Zellspannung von 0,25 V bei hohem Laststrom festgelegt. Durch den hohen Strom, wird ein Betriebspunkt mit sehr geringem Wirkungsgrad und sehr hoher Eigenerwärmung des Brennstoffzellenstapels vorgegeben. Zur schnelleren Aufheizung des Systems wird in diesem Modell die Verwendung eines Kühlmittelzuheizers vorgesehen, der gleichzeitig eine elektrische Last für den hohen Brennstoffzellenstrom darstellt. Ansätze dieser Art werden in [175] im Rahmen einer Patentanalyse beschrieben. Der Zellenstrom lässt sich über die Last aus Nebenverbrauchern und Kühlmittelheizer nach Gl. 66 berechnen:

Grenzstrom

$$I_{grenz} = \frac{U_{min}}{P_{KMH} + P_{Last}}$$

Mit:

U_{min} : Minimalspannung

P_{KMH} : Leistung Kühlmittelheizer

P_{Last} : Leistung Last

Gl. 66

Zur Erwärmung des Zellstapels stehen die direkte Wärmeleistung des Kühlmittelheizers und die Verlustleistung durch die Stromlast der angeschlossenen Nebenverbraucher. Die Temperatur des Zellstapels ergibt sich aus Gl. 67:

Temperatur Zellstapel

$$T_{BZ} = \int_o^T \frac{\dot{Q}_{Kühlmittel}}{c_p} dt$$

Mit:

T_{BZ} : Temperatur Zellstapel

$\dot{Q}_{Kühlmittel}$: Kühlmittelwärmeeintrag

c_p : Wärmekapazität

Gl. 67

Für die Temperaturschätzung des Zellstapels werden die gleichen Daten, wie in 7.5.2.1 verwendet. Es gelten die in Tabelle 19 genannten Randbedingungen für Li-Ionen-Akkus und angenommene Leistungswerte:

Wärmekapazität (Zellstapel und Kühlmittel)	c _p :	48,8 kJ/K
Leistung Kühlmittelheizer	P _{KMH} :	12 kW
Elektrische Last (Nebenverbraucher)	P _{Last} :	15 kW

Tabelle 19: Randbedingungen für die Erwärmung des Brennstoffzellensystems

Die elektrische Last ist eine Abschätzung der maximalen Last, mit der die Brennstoffzelle zur schnelleren Eigenerwärmung im Startfall belastet werden kann. Der Zustandsautomat der Steuerung reagiert auf Basis der verfügbaren Maximalleistung der Brennstoffzelle während des Startverlaufs. Die temperaturabhängige Maximalleistung wird daher analog zur Modellierung in 7.5.2.1 als Kennlinie

abgelegt und dient dem Zustandsautomaten als Eingangssignal. Die Kennlinien beschreiben den Fall einer gut befeuchteten Membran. Die verwendeten Kennlinien zeigt Abbildung 147

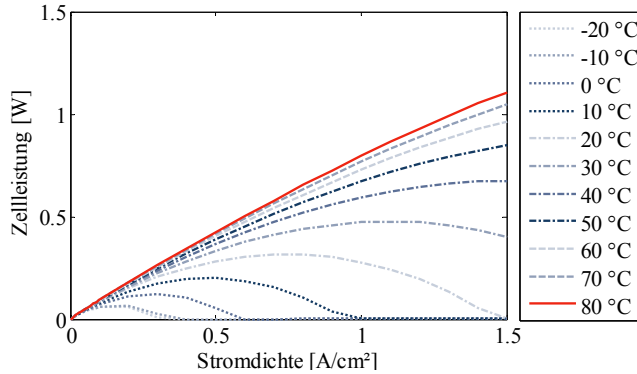


Abbildung 147: Temperaturabhängige Zelleistungskennlinien für die Brennstoffzelle

Die Startstrategie für den Aufheizvorgang ist aus [184] übernommen. Bei geringer verfügbarer Leistung der Brennstoffzelle wird zunächst der Kühlmittelheizer versorgt und erst danach die weiteren Nebenverbraucher. Der Betrieb des Zuheizers wird bei Erreichen einer Temperatur von 10 °C beendet.

Das Modell für den Aufwärmvorgang der Batterie wird analog dazu implementiert und daher hier nicht im Detail beschrieben. Allerdings wird für die Batterie eine zusätzliche Abhängigkeit der möglichen Leistungsabgabe vom Batterieladestand berücksichtigt. Dieser lässt sich nach Gl. 68 berechnen:

$$\text{Batterieladestand} \quad SOC = (K_B \cdot SOC_{ini}) - \int_0^T I_{Bat} dt \quad \text{Gl. 68}$$

Mit: K_B : Batteriekapazität SOC_{ini} : Initilladestand I_{Bat} : Batteriestrom

Die Modellteile entsprechen den Darstellungen in 7.5.4. Für das Batteriesystem wird hier ebenfalls ein Kühlmittelheizer definiert, wie in [185] dargestellt, wo die Aufheizung einer Hybridisierungsbatterie mit internen oder externen Zuheizern beschrieben wird. Diese sind notwendig, da aufgrund des hohen Wirkungsgrads der Batterie ihre Eigenaufheizung durch Verlustwärme gering ist. Für die Batterie gelten die Randbedingungen in Tabelle 20:

Wärmekapazität (Batterie und Kühlmittel)	c_p :	30,5 kJ/K
Leistung Kühlmittelheizer	$P_{KMH,B}$:	12 kW
Elektrische Last (Nebenverbraucher)	P_{Last} :	2 kW
SOC-Fenster	SOC	[0,3...0,7]

Tabelle 20: Randbedingungen für die Erwärmung der Batterie

Die Batterie wird im hier untersuchten Szenario mit 2 kW belastet. Dies entspricht dem Fall, dass der Verdichter des Brennstoffzellensystems aus der Batterie gestartet wird. Bei Start des Brennstoffzellensystems wird diese Last sofort übergeben. Die Batterie kann nicht mit höheren Leistungen beaufschlagt werden, da sie sich sonst zu stark entlädt. Der Zuheizer der Batterie wird bei 0 °C deaktiviert. Dies ist wiederum angelehnt an die Betriebsstrategie aus [181], bei der die Batterie bei 0 °C auch für eingeschränkten Ladebetrieb freigegeben wird. Für den Fahrbetrieb ist dies eine wichtige Randbedingung.

Das implementierte Modell erlaubt eine vollständige Untersuchung der Betriebsart „Starten“. Es können sowohl physikalische Anforderungen getestet werden, als auch das Verhalten der steuernden Zustandsautomaten.

9.4.3 Simulation des Systemverhaltens für den Kaltstartfall

Für die Simulation des Startablaufs werden die Ergebnisse aus der Ablaufplanung („Scheduling“) in 8.3.2 verwendet. Die dort angenommenen Verzögerungen für Schaltvorgänge oder das Vorladen des Bordnetzes werden im Modell übernommen. Als Prüfkriterium für die Simulation gilt die bereits in 8.3.2 beschriebene Anforderung, nach der das Antriebssystem bei einem Kaltstart aus $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ innerhalb von 30 s mindestens 50 % seiner Nennleistung erreichen muss. Für die hier implementierte Zustandsmaschine gilt dieser Punkt als Auslöser der vollen Fahrfreigabe des Fahrzeugs. Die Ergebnisse für den Aufheizvorgang zeigt Abbildung 148:

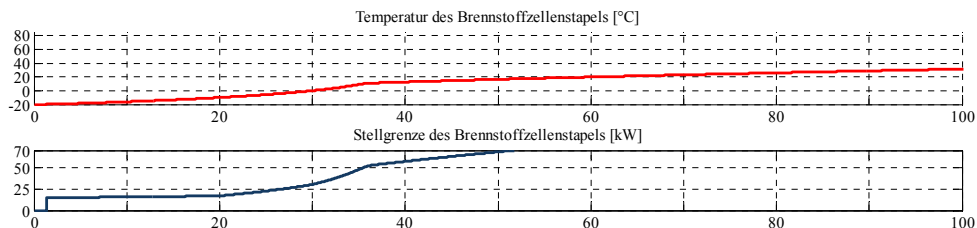


Abbildung 148: Zeitverlauf des Aufheizvorgangs für das Brennstoffzellensystem [s]

In der Temperaturkurve des Zellstapels erkennt man zunächst einen schnellen Anstieg. Bei $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird der Zuheizer deaktiviert. Der Temperaturanstieg ist danach erwartungsgemäß schwächer. Die verfügbare Leistung des Brennstoffzellensystems zeigt hier bereits bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ einen relativ hohen Wert von etwa 18 kW. Es handelt sich hier jedoch um einen relativ leistungsstarken Zellstapel, der hohe Stromdichten liefern kann. Der Sprung zu Beginn der Kurve ist eine Zeitverzögerung in einem Kreisschluss der Simulation und hat keine physikalische Bedeutung. Abbildung 149 zeigt die entsprechenden Verläufe für das Batteriesystem:

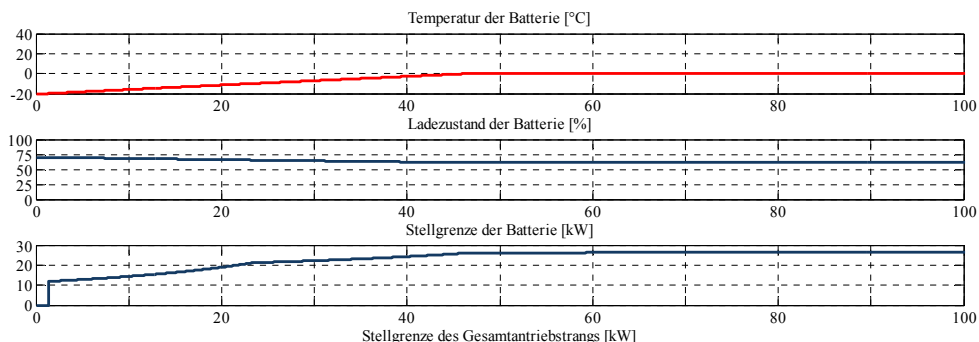


Abbildung 149: Zeitverlauf des Aufheizvorgangs für das Batteriesystem [s]

Der Temperaturanstieg für das Batteriesystem ist trotz des Zuheizers deutlich langsamer. Aufgrund der schwachen Eigenerwärmung bleibt die Temperatur nach der Deaktivierung des Zuheizers bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ konstant. Hierbei muss beachtet werden, dass ein reiner Startbetrieb im Stillstand betrachtet wird. In einem vollständigen Start-Use-Case würden angeforderte Fahrleistungen zur Erwärmung der beiden Energiewandler beitragen. Das Batteriesystem wird hier nicht mit weiteren Nebenverbrauchern belastet. Der Grund ist der Ladezustand der Batterie, der in den 47 s des Zuheizbetriebs bereits auf 61 % absinkt. Die zur Verfügung stehende Leistung der Batterie hat zu diesem Zeitpunkt mit 26,2 kW aber bereits fast ihr Maximum erreicht. Dies deckt sich mit den Darstellungen in [181].

Die gesamte Systemleistung des Antriebssystems, die sich aus den ansteigenden Stellgrenzen der Energiewandler ergibt, zeigt Abbildung 150. Darin sind auch zwei Ausgangssignale des Systemarbitrierers dargestellt, die eingeschränkte Fahrfreigabe und die volle Fahrfreigabe.

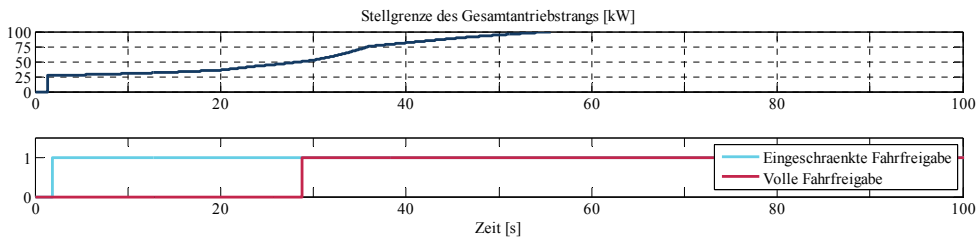


Abbildung 150: Ansteigende Systemleistung und Fahrfreigaben durch den Zustandsautomaten

Die eingeschränkte Fahrfreigabe wird erteilt, wenn mindestens einer der Energiewandler seine Bereitschaft gemeldet hat und die Systemleistung 25 % der Nennleistung erreicht hat. Dieser Punkt wird hier bereits nach 1,85 s erreicht. Ab diesem Zeitpunkt ist also ein Anfahrbetrieb mit eingeschränkter Leistung möglich. Die volle Fahrfreigabe wird bei 50 % der Nennleistung erteilt. Dieser Punkt wird mit der hier gewählten Startstrategie nach 28,8 s erreicht. Damit wird unter den gewählten Randbedingungen die Anforderung von 30 s erfüllt. Der Startablauf lässt sich weiter beschleunigen, wenn der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems weiter abgesenkt werden kann. Zur Abschätzung des Steigerungspotentials wurde eine Simulation mit 20 % erhöhter Verlustleistung durchgeführt. Die volle Fahrfreigabe wird in diesem Szenario bereits bei 24,5 s erreicht. Dies entspricht einer Reduktion von 15 %.

Nach der Validierung der Ablaufplanung („*Scheduling*“) und einer Überprüfung der zeitlichen Anforderungen, muss das Verhalten der Zustandsmaschinen getestet werden. Abbildung 151 zeigt die Reaktionen für das Subsystem SA: System Arbitrator.

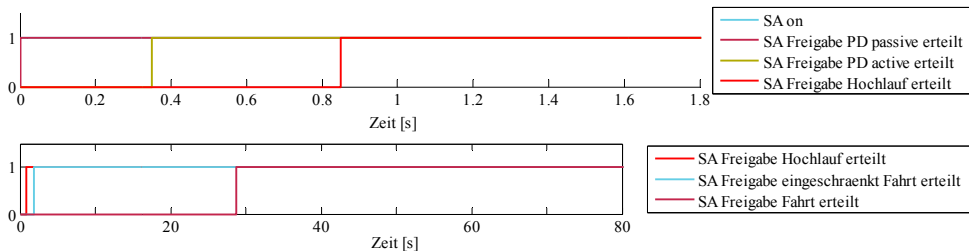


Abbildung 151: Reaktives Verhalten des Zustandsautomaten SA während der Kaltstartsimulation

Die obere Darstellung zeigt auf einer Zeitachse bis 1,8 s die Freigabe der passiven Startvorbereitung, die Teil des vorgegebenen Szenarios ist, sowie die Freigabe der aktiven Startvorbereitung bei 0,35 s. Diese dauert gemäß der Anlaufzeit der Kühlmittelpumpe 0,5 s. Der Hochlauf wird danach bei 0,85 s freigegeben. Im unteren Bildteil von Abbildung 151 ist dieser Zeitpunkt zusammen mit den Fahrfreigaben auf einer längeren Zeitachse dargestellt. Die Ausgangssignale passen zur Planung im Sequenzdiagramm und den in der Ablaufplanung („*Scheduling*“) kalkulierten Zeiten. Abbildung 152 zeigt die korrelierenden Ausgabesignale des Zustandsautomaten für das Batteriesystem:

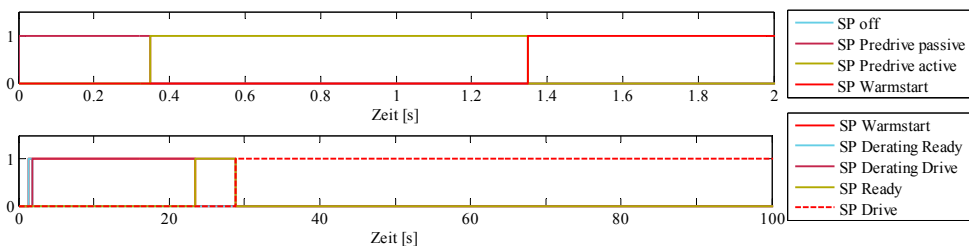


Abbildung 152: Reaktives Verhalten des Zustandsautomaten SP während der Kaltstartsimulation

Die passive und aktive Vorlaufphase werden in direkter Reaktion freigegeben. Der Start der Hochlaufphase erfolgt bei 1,35 s, also 0,5 s nach dessen Freigabe. Dies entspricht der Zeit für das Schließen der Trennschütze. Der eingeschränkte Batteriebetrieb (SP Derating Ready) wird bei 1,85 s gestartet, da zu diesem Zeitpunkt bereits die in 9.3 definierte Temperaturgrenze von -20 °C erreicht ist. Der volle

Batteriebetrieb (SP Ready) startet bei 23,5 s, dem Zeitpunkt des Überschreitens der Temperaturgrenze von -10 °C. Der Sprung in den Fahrbetrieb (SP Drive) ist bei 28,8 s zu sehen. Er fällt mit dem Zeitpunkt der vollen Fahrfreigabe zusammen, da in dem beschriebenen Testszenario ein permanenter Fahrwunsch simuliert wird.

Abbildung 153 zeigt die Ausgaben des Zustandsautomaten für das Brennstoffzellensystem:

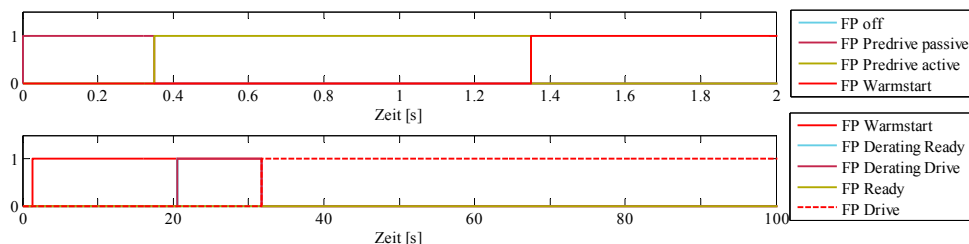


Abbildung 153: Reaktives Verhalten des Zustandsautomaten FP während der Kaltstartsimulation

Analog zum Subsystem FP erfolgt die Startfreigabe bei 1,35 s nach dem Schließen der Batterieschütze. Es wird davon ausgegangen, dass Komponenten des Brennstoffzellensystems wie der Verdichter zu diesem Zeitpunkt aus der Batterie gespeist werden. Der eingeschränkte Brennstoffzellenbetrieb (FP Derating Drive) fällt mit seiner Bereitschaft (FP Derating Ready) bei 20,6 s zusammen, da zu diesem Zeitpunkt 25 % der Brennstoffzellenleistung verfügbar sind und bereits ein Fahrwunsch vorliegt. Das Gleiche passiert bei 31,7 s für den Vollbetrieb der Brennstoffzelle (FP Drive) und seine Bereitschaft (FP Ready), da das Erreichen der Grenze von 50 % der Brennstoffzellenleistung zu diesem Zeitpunkt hinter der Fahrfreigabe des Fahrbetriebs bei 28,8 s erfolgt. Alle Zustandsautomaten zeigen somit das erwartete Verhalten.

Die Auswertung der Schaltereignisse schafft einen schnellen Überblick zur Überprüfung der Sequenzen. In weiteren Schritten kann die gleiche Modellierung auf andere Betriebsarten angewandt werden. Die einzelnen Bestandteile der Zustandsautomaten fügen sich somit zu einem Gesamtentwurf zusammen. Dadurch ist die Modellierungskette von der Use-Case-Definition bis zum Steuerungsentwurf geschlossen.

9.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde dargestellt, wie sich die Ergebnisse der Sequenzmodellierung und Ablaufplanung, zunächst für einzelne Betriebsarten, zu einem Entwurf eingebetteter Zustandsautomaten nutzen lassen. In der Modellnotation SysML wurden sowohl Zustände als auch Zustandsübergänge modelliert. Zur Validierung des Entwurfs wurde ein Simulationsmodell implementiert, welches eine integrierte Co-Simulation der diskreten Zustandsautomaten mit einer kontinuierlichen physikalischen Modellierung des Startverhaltens ermöglicht. Unter Nutzung einer vorgegebenen Startstrategie wurde untersucht, wie ein Kaltstartverlauf ab -20 °C abläuft und wie die ereignisgesteuerten Zustandsautomaten auf definierte Schwellwerte reagieren. Die Auswertung der Schaltereignisse zeigt alle Systemreaktionen und bestätigt die Übereinstimmung mit den geplanten Abläufen aus der Verhaltensmodellierung. Mit geeigneten Werkzeugen ließe sich der modellbasierte Entwurf nicht nur wie hier dargestellt in der Validierung, sondern auch zur Codegenerierung für die Steuerung des Realsystems nutzen.

Die genannte Anforderung einer Startzeit unter 30 s lässt sich mit der betrachteten Systemkonfiguration erfüllen. Eine eingeschränkte Fahrfreigabe wird für das System bereits bei 1,85 s erteilt, die volle Fahrfreigabe bei 28,8 s. Für beide Energiewandler wirkt sich der Einsatz von Kühlmittelheizern positiv aus. Die Batterie ist ohne den eingesetzten Zuheizung nicht nennenswert erwärmbar. Die abgegebene Leistung ist aber für den Entladebetrieb ausreichend um den Start des Brennstoffzellensystems und einen Anfahrbetrieb des Fahrzeugs zu ermöglichen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Elektrische Antriebstechnik für Kraftfahrzeuge, die geeignet ist, trotz zukünftiger Verknappung der Energierohstoffe dennoch den Bedarf nach individueller Mobilität in gewohnter Art und Weise zu decken, wird in Zukunft eine immer größere Rolle spielen. Die Brennstoffzelle als Energiewandler ist hierfür ein vielversprechender Ansatz, da nur auf diesem Weg ähnlich hohe Energiedichten erreicht werden können wie zurzeit in konventionellen Fahrzeugen. Systembedingt erlauben sie größere Reichweiten und wesentlich kürzere Betankungszeiten als Batteriefahrzeuge und sind daher gerade für den Langstreckeneinsatz ein attraktiver Teil des zukünftigen Antriebsportfolios.

Heutige konventionelle und alternative Antriebssysteme zeichnen sich durch eine hohe Komplexität aus. Sie vereinen mechanische, elektrische und elektronische Komponenten in Verbindung mit eingebetteter Steuerungssoftware zu einem leistungsstarken, mechatronischen System. In der Regel bestehen Systeme dieser aus einem hochintegrierten Verbund von Teilsystemen mit vielfältigen Wechselwirkungen. Im Fall der Brennstoffzelle sind dies insbesondere verfahrenstechnische Komponenten zur Luft- und Wasserstoffversorgung, elektrische Komponenten des Hochspannungsbordnetzes sowie Komponenten des Kühlsystems. In einem hybridisierten Antriebsstrang, wie er in dieser Arbeit betrachtet wird, kommen ein Batteriesystem und ein System zum Energiemanagement hinzu, ebenso wie die elektrische Traktionsmaschine und die zu deren Ansteuerung benötigte Leistungselektronik.

Überwacht und gesteuert werden alle diese Systeme von einem Netzwerk elektronischer Steuergeräte, die auch selbst miteinander wechselwirken. Neben der Ansteuerung und Überwachung der Komponenten müssen heute Anforderungen an die Einbindung immer neuer Funktionen erfüllt werden. Außerdem soll die Konnektivität mit externen Systemen, wie Lade-, Tank- oder Diagnosesystemen sichergestellt und die jeweils neueste Technologie genutzt werden. Gleichzeitig besteht die Forderung nach immer kürzeren Entwicklungszyklen, einer hohen Variantenvielfalt, sowie geringen Entwicklungs- und Systemkosten.

Bisherige Entwicklungs- und Spezifikationsansätze auf diesem Gebiet basieren überwiegend auf nicht systematischen, auf persönlichen Erfahrungen basierenden Ad-hoc-Betrachtungen. Insbesondere die Definition der Systemanforderungen und deren Umsetzung in einem Konzeptentwurf lassen sich jedoch weiter systematisieren und verbessern. Daher wird in dieser Arbeit eine Methodik für die frühen Phasen des Systementwurfs entwickelt und am Beispiel der Brennstoffzellenantriebe umfassend angewendet. Ziel ist es die Anforderungsanalyse und den Entwurf des Systemkonzepts zu optimieren um im Spannungsfeld aus Systemkomplexität, Entwicklungszeit und Kosten einen Effizienzgewinn zu realisieren. Das zur Zielerreichung gewählte systematische Vorgehen ist in Abbildung 154 dargestellt:

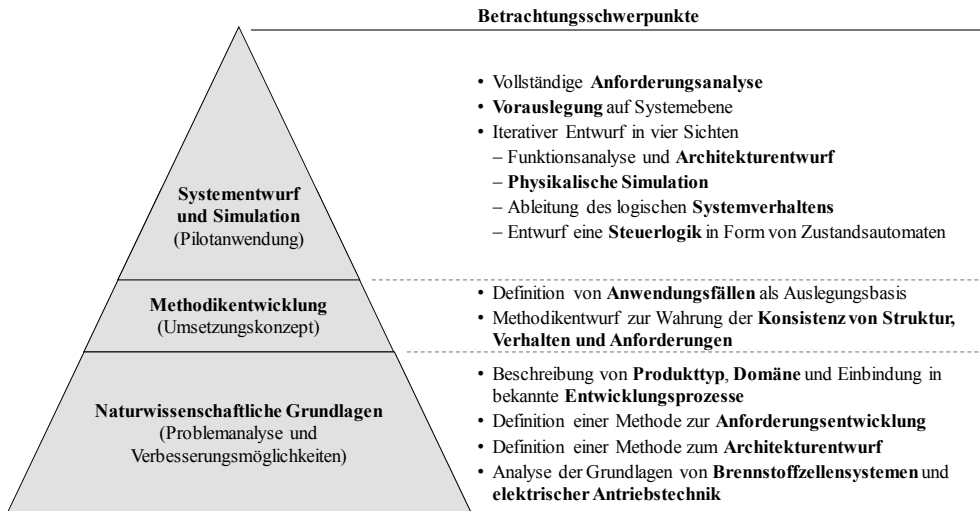


Abbildung 154: Pyramidale Struktur aus Problemanalyse, Methodikentwicklung und Anwendung („Bottom-Up“-Vorgehensweise)

Als Basis für alle weiteren Überlegungen erfolgt zu Beginn eine Auseinandersetzung mit den naturwissenschaftlichen Grundlagen und den technischen Gegebenheiten von Antriebssystemen mit Brennstoffzellen. Umfang und Detaillierungsgrad der gesuchten Methodik hängen nämlich sehr stark vom betrachteten Produkttyp, vom technischen Feld (Domäne), in der sich das betrachtete Produkt bewegt und von der Einbettung in vorhandene Entwicklungsprozesse ab. Daher werden zunächst die Grundlagen heutiger Systementwicklungsprozesse analysiert und beschrieben. Neben den wesentlichen Vorgehensmodellen, wie dem bekannten V-Modell, werden auch die typischen Phasen der Systementwicklung erläutert. Übliche Entwicklungsprozesse, die in unterschiedlichen technischen Feldern gebräuchlich sind, werden vorgestellt. Für die Definition der Methodik ergibt sich bereits an dieser Stelle eine Reihe von Festlegungen:

- *Der grundsätzliche Phasenablauf* bekannter Entwicklungsabläufe muss befolgt werden.
- *Modellbasierte Methoden* sollen verwendet werden; also solche, die auf graphische Notationen und entsprechende Werkzeuge zurückgreifen um das Co-Design von Hardware- und Softwareanteilen zu unterstützen und Dokumentationsaufwände zu reduzieren.
- *Eine iterative Vorgehensweise*, wie sie in der Softwareentwicklung üblich ist, soll verwendet werden.
- Der Umfang der Entwurfsmethodik soll alle Schritte *bis zur Spezifikation der Subsysteme* umfassen.

Da die Phase der Anforderungsentwicklung ein besonderer Schwerpunkt dieser Arbeit ist, wird diese Phase getrennt beschrieben. Im Kontext modellbasierter Entwicklungsmethoden werden Modelle vorgestellt, die in der Softwareindustrie zur Anforderungsentwicklung und zur frühen Produktdefinition verwendet werden:

- *Zielmodellierung zur Definition von Nutzerbedürfnissen*: Eine solche Darstellung wird als Eingangsebene für die Methodik definiert.
- *Use-Case-Modellierung*: Die Darstellung von Anwendungsfällen im Zusammenspiel mit allen Akteuren, die mit dem System interagieren, ist die Grundlage für die Beschreibung der Systemfunktionen als Teil der neuen Methodik.

Für diese Arbeit wird festgelegt, dass die Use-Cases als zentraler Ausgangspunkt für nachfolgende Schritte zu verwenden sind. Die Fokussierung auf die Bedürfnisse der Nutzer steht damit im Vordergrund. Im Anschluss werden die Grundlagen der Funktionsmodellierung und der Entwicklung einer modularen Systemarchitektur beschrieben:

- Der *Modularität und dem Architekturentwurf* wird besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Das *architekturzentrierte Arbeiten* wird als weiteres Kernmerkmal der Methodik definiert. Um einen

durchgängigen Entwurf der Systemarchitektur zu ermöglichen, müssen entsprechende Teilmodelle sowie eine strukturierte Vorgehensweise für deren Verarbeitung und Integration aufgebaut werden.

- Nach einem systematischen Vergleich von Notationen der *Funktionsmodellierung* wird die *Beschreibungssprache SysML* (Systems Modeling Language) für die weitere Verwendung ausgewählt.

Um die spezifischen Gegebenheiten und vielfältigen Wechselwirkungen des Anwendungsbeispiels in die Methodenentwicklung einzubeziehen, werden die chemischen und physikalischen Grundlagen der Brennstoffzellen und sonstiger Komponenten elektrischer Antriebsstränge beschrieben. Insbesondere werden spezielle Randbedingungen der Automobilanwendung identifiziert, wie schwankende klimatische Bedingungen, Degradation der Leistungsfähigkeit im Verlauf der Lebensdauer oder kritische Anwendungsfälle wie der Kaltstart.

Damit sind alle wesentlichen Grundlagen für die Definition der Methodik und für die spätere Modellierung bekannt. Tabelle 21 zeigt eine Zusammenfassung der Schwerpunkte der Problemanalyse. Das Ergebnis dieser Phase sind eine Reihe zentraler Festlegungen für den Methodenentwurf und die technischen Grundlagen für die spätere Implementierung der Werkzeugkette und der benötigten Simulationsmodelle:

Betrachtungsfelder	Schwerpunkte der Betrachtung	Wesentliche Ergebnisse
Entwicklungsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzlicher Phasenablauf • Modellbasierte Methoden • Iterative Vorgehensweise 	<ul style="list-style-type: none"> • Beachtung bekannter Phasenabläufe • Modellbasierte Methoden zum Co-Design von Hardware- und Softwareanteilen
Anforderungsentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Zielmodellierung • Use-Case-Modellierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zielmodellierung zur Definition von Nutzerbedürfnissen • Grundlage für die Beschreibung der Systemfunktionen
Funktionsanalyse und Systemarchitektur	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen und Notationen der Funktionsmodellierung • Modulare Produktentwicklung und algorithmische Techniken zur Modulbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl der SysML als Beschreibungsnotation • Grundlagen für Auswahl und Implementierung eines Clusteralgorithmus zur Modulbildung
Brennstoffzellen und elektrische Antriebstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Technische Grundlagen • Klimatische Bedingungen • Systemabläufe und kritische Anwendungsfälle 	<ul style="list-style-type: none"> • Alle Randbedingungen für die physikalische Simulation und die spätere Sensitivitätsanalyse • Grundlagen für Modellbildung

Tabelle 21: Betrachtungsschwerpunkte und Festlegungen als Ergebnis der Problemanalyse

Anschließend werden die Kernmerkmale der Methodik vorgestellt. Die wesentlichen Vorteile ihrer Anwendung werden auf Basis der beschriebenen Grundlagen erläutert. Das Vorgehen für die weitere Arbeit wird festgelegt:

- *Strukturierte Systemableitung basierend auf Anwendungsfällen (Use-Cases)*
- *Konsistenz von Struktur, Systemverhalten und Anforderungen durch einen modellbasierten Entwurfsansatz in vier Sichten: Funktion, Physik, Abläufe, Zustände*

Durch dieses Vorgehen soll der Fluss der Anforderungs- und Konzeptentwicklungsschritte optimiert und gleichzeitig die Konsistenz zwischen Entwurfsmodellen mit zunehmendem Detaillierungsgrad verbessert werden. Tabelle 22 zeigt zusammenfassend die getroffenen Festlegungen als Ergebnis der Methodenentwicklungsphase:

Betrachtungsfelder	Schwerpunkte der Betrachtung	Wesentliche Ergebnisse
Definition der Kernmerkmale	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung in SysML • Modellbasierte Methoden 	<ul style="list-style-type: none"> • Iterativer, modellbasierter Entwurf • Architekturzentriertes Arbeiten
Methodikentwurf	<ul style="list-style-type: none"> • Konsistente Betrachtung von Struktur, Verhalten und Anforderungen durch Modellierung in unterschiedlichen Sichten 	<ul style="list-style-type: none"> • Systemableitung aus Anwendungsfällen • Modellbasierter Entwurfsansatz in vier Sichten: Funktion, Physik, Abläufe, Zustände

Tabelle 22: Betrachtungsschwerpunkte und Ergebnisse der Methodikentwicklung

Mit der darauffolgenden Anforderungsanalyse des elektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzellen erfolgt der erste Schritt der Methodikanwendung. Auf der Basis einer Beschreibung von Aufwänden

und Nutzen der „Requirements-Engineering“-Phase werden konkrete Schritte für die anwendungs-fokussierte Spezifikationsmethodik abgeleitet:

- Eine Kombination aus Zielmodellierung und Use-Case-Modellierung wird verwendet. Die Modelle werden vollständig aufgebaut. Die Zielmodellierung mit insgesamt 70 Zielen liefert 195 Anforderungsgruppen, die im Systemlastenheft erfasst werden. Das Use-Case-Modell mit insgesamt 34 Use-Cases liefert ein genaues Modell der Systemumgebung und eine Definition der Betriebsarten.
- Aus Sicht des Entwicklungsprozesses ergibt sich der klare Bedarf nach einer schrittweisen Freigabe und Übertragung der Analyseergebnisse, also einer iterativen Vorgehensweise, um Kapazitätskosten der Anforderungsphase und Übergabekosten an die Entwicklung auszubalancieren. Während der Anwendung der Methodik muss ein Anforderungsreview daher in regelmäßigen, kurzen Abständen stattfinden.
- Es wird eine einfache Struktur für ein Systemlastenheft entworfen, die zwischen funktionalen Anforderungen, Qualitätsattributen und benötigten Fahrleistungen unterscheidet. Für die verwendete Methodik der Anforderungssammlung wird in einer Analyse der aufgebauten Anforderungsdatenbank ein schneller, iterativer Fortschritt nachgewiesen.

Anschließend wird eine Vorauslegung auf Systemebene beschrieben, deren Ziel es ist, den Entwurfsraum zugunsten der Analysegeschwindigkeit einzuschränken. Unter Entwurfsraum wird hier die Schwankungsbreite der das System und seine Grenzen definierenden wichtigsten Parameter bezeichnet. In diesem Schritt der Spezifikationsmethodik werden Designentscheidungen getroffen, die sich direkt aus den Anforderungen ergeben. Wie in allen nachfolgenden Entwurfsphasen wird auch in dieser Vorauslegung das elektrische Antriebssystem anhand seiner Betriebsarten, die sich aus der Use-Case-Analyse ergeben, gegliedert. Durch die Betrachtung einzelner Betriebsarten wird es ermöglicht, zunächst eine reduzierte Menge an Akteuren, Schnittstellen oder Anforderungen in den Entwurfsschritt einzubeziehen. Durch die Betrachtung aller Betriebsarten werden dann alle möglichen Kombinationen von Akteuren, Schnittstellen oder Anforderungen abgedeckt. Die Vorauslegung wird beispielhaft für die Betriebsart „Fahren“ durchgeführt.

- Die Leistungsauslegung und der Hybridisierungsgrad werden als zentrale Auslegungsmerkmale identifiziert, die numerisch bestimmt werden müssen.
- Zur Leistungsauslegung werden geforderte Fahrleistungen aus dem Lastenheft in einer statischen Längsdynamik-Simulation rechnerisch überprüft. Diese wird durch eine dynamische Simulation für unterschiedliche Fahrzyklen ergänzt. Es zeigt sich, dass eine Auslegung auf 90 kW Antriebsleistung mit einem Drehmoment von 200 Nm ausreichend ist um alle Fahrsituationen abzudecken.
- Zur Untersuchung des Hybridisierungsgrads wird der Energiebedarf der Fahrzyklen mit Verbrauchssimulationen kombiniert. Die Verbrauchssimulationen verwenden für das Antriebssystem eine bekannte Betriebsstrategie und liefern ein Optimum bei einer Verteilung von 70 % Brennstoffzellenleistung und 30 % Batterieleistung. Die Batteriekapazität wird daraufhin auf 2 kWh festgelegt.
- Anhand der Daten einer bekannten Kostenstudie lässt sich die Auswirkung einer Variation des Hybridisierungsgrads auf die Systemkosten abschätzen. Diese überschlägige Berechnung dient als Referenz für spätere Vergleiche.

Nach der Anforderungsanalyse und der Vorauslegung folgt der iterative Entwurf des Antriebssystem wobei die vier genannten, zentralen Entwurfssichten: Funktion, Physik, Abläufe und Zustände, verwendet werden. Dadurch wird ein modellbasierter, ganzheitlicher Systementwurf erreicht, der die für eine Systementwicklung wesentliche Einheit von Funktion, Struktur und Verhalten herstellt. Als Ausgangsbasis hierfür wird die Funktionsarchitektur des Systems abgeleitet. Diese ist die zentrale Systembeschreibung, auf deren Basis die Systemaufteilung, die Aufgaben einzelner Bereiche sowie deren Wirkbeziehungen beschrieben werden. Um die Funktionsarchitektur zu erstellen wird eine Zerlegung in Produktfunktionen durchgeführt und zu einem Funktionsnetz verbunden, welches im Anschluss in logische Subsysteme aufgeteilt wird. Dazu wird ein Clusteralgorithmus verwendet, dessen Wirksamkeit auf der Basis von Kennzahlen und einer qualitativen Bewertung beurteilt wird. Das Vorgehen liefert folgende Ergebnisse:

- Es wird ein Ansatz entwickelt, der es erlaubt, die Funktionen nach den Wirkbeziehungen eines Regelkreises anzuordnen und zu vernetzen. Dadurch ergibt sich ein relativ einfaches formales

Vorgehen, das es erlaubt, eine Menge von 446 Funktionen und deren Funktionsverbindungen zu identifizieren.

- Es wird eine Werkzeugkette aufgebaut, welche die Funktionen basierend auf ihrem Funktionstyp gewichtet und anschließend mit einem „K-Means“-Clusteralgorithmus gruppiert. Der Vergleich verschiedener Clusterverfahren liefert die beste Betrachtungsmatrix und ein geeignetes Gewichtungsschema.
- Die resultierenden Funktionsgruppen werden in der Beschreibungsnotation SysML zu einer Funktionsarchitektur aufgebaut. Durch die entworfene Verarbeitungskette ist eine klare Verbindung von der Anforderungsbeschreibung in Form des Use-Case-Modells bis zur Definition der Funktionen und ihrer Anordnung in der Funktionsarchitektur hergestellt.

Es folgt die physikalische Beschreibung des Brennstoffzellensystems. Das Ziel der physikalischen Entwurfssicht ist die Parametrierung von Schnittstellengrößen aus der Funktionsarchitektur. Dazu wird die Funktionsarchitektur verwendet, um eine Modellstruktur physikalischer Wirkketten zu definieren. Diese werden in einem stationären Simulationsmodell in Matlab/Simulink implementiert, mit dessen Hilfe eine systematische Parametervariation durchgeführt wird. Dabei werden externe Lastgrößen mit Konfigurationen des Systems kombiniert. Auf diese Art und Weise werden die Schwankungsbreiten der wesentlichen, das Systemverhalten beschreibenden physikalischen Parameter bestimmt. Als Analyseergebnis der physikalischen Sicht lässt sich festhalten:

- Die Modellstruktur wird vollständig aus der Funktionsarchitektur hergeleitet.
- Die Wirkung abgeschwächter Fahrleistungsanforderungen auf die Parameterwerte wird dargestellt, indem neben der Maximalast der Fahrzyklen, auch abgeschwächte Lastpunkte (90. und 75. Perzentil) als Eingangswerte für die Berechnung verwendet werden. Dadurch lässt sich eine quantifizierte Wirkung für die Senkung der Systemanforderungen darstellen. Durch eine Abkehr vom 100 %-System lassen sich prinzipiell hohe Einsparungen erzielen.
- Simulationen von Szenarien mit verschiedenen Klimadaten, Betriebsstrategien und Systemkonfigurationen werden durchgeführt. Der Modelleinsatz erlaubt einen einfachen Vergleich der resultierenden Ergebnisverteilungen. Die deutlichste Auswirkung auf die Parameterwerte des Systems zeigt die Untersuchung einer Wirkungsgradstrategie, bei der im Falle ausreichender Stellreserve eine Betriebspunktverschiebung der Brennstoffzelle zu niedrigeren Strömen und höheren Wirkungsgraden durchgeführt wird. Die Anforderungen an die Bruttoleistung der Brennstoffzelle sinken in diesem Experiment um 24,7 %, die abzuführende Wärmelast sinkt entsprechend um 25,1 %.
- Auf der Basis bekannter Kostenstudien werden die Kostenwirkungen der Parameteränderungen quantifiziert.
- Der Modellierungsansatz stellt ein nützliches Analysewerkzeug dar, um Sensitivitätsanalysen durchzuführen und Werteverteilungen für die Schnittstellenparameter zu bestimmen. Damit lässt sich im Entwurfsablauf eine Spezifikation der Subsysteme aufstellen.

Nach der Analyse der funktionalen und strukturellen Aspekte des Entwurfs folgt die Überleitung zu einer damit konsistenten Beschreibung des Systemverhaltens. Dazu werden in der dritten Entwurfssicht logische Abläufe betrachtet, die sich aus der Definition der Use-Cases ergeben. In den Use-Cases werden Ablaufketten und Systemreaktionen auf Befehle und Eingaben des Nutzers (z.B. Leistungsanforderung durch Pedalbetätigung, Fahrzeugstart durch Schalterbetätigung, etc.) definiert. Die Ablaufmodellierung greift diese Information auf und erweitert sie zu technischen Abläufen, die später in Form einer Steuerlogik realisiert werden können. Wie schon in der Vorauslegung und in der Funktionsanalyse wird hierbei aus Komplexitätsgründen nicht das Gesamtsystem betrachtet, sondern einzelne Betriebsarten, wie der Startbetrieb oder der Fahrbetrieb. Die Ergebnisse dieser Analysen mit reduziertem Betrachtungsrahmen werden später zusammengeführt. Zur Analyse werden für jede Betriebsart Aktivitätsdiagramme der SysML-Notation verwendet. In diesen werden logische Abläufe als Sequenz sogenannter Systemaktivitäten definiert. Die Darstellung beinhaltet zusätzlich Anforderungen oder Bedingungen, die aus der Anforderungsanalyse resultieren. Die Modellierung der logischen Abläufe liefert folgende Ergebnisse:

- Abläufe und Bedingungen aus den Use-Cases werden auf Konsistenz überprüft.
- Zur Kombination unterschiedlicher Ablaufmodelle wird eine Werkzeugkette implementiert, die aus der graphischen Darstellung ein Netzwerk extrahiert, welches in Matlab verarbeitet werden kann.

- Mit dem erstellten Aktivitätsnetzwerk und Zeitbedingungen aus der Anforderungsanalyse wird eine Ablaufplanung für den Startfall durchgeführt. Dabei werden Systemaktivitäten als sequenzielle oder parallele Abläufe angeordnet und mit Grenzen für die Durchlaufzeiten versehen.
- Das gesamte Aktivitätsnetzwerk wird über eine Modelltransformation in ein Sequenzdiagramm überführt. In dieser Darstellung wird für den Ablauf des Startfalls das Wechselspiel der verschiedenen Subsysteme dargestellt. Dadurch lassen sich subsystembezogene Zustände definieren, die als Grundlage für den Entwurf von Zustandsautomaten zur Steuerung dienen.
- Die Verhaltensmodellierung in Aktivitätsdiagrammen wird als zentrales Bindeglied zwischen Use-Cases, Funktionsarchitektur und der späteren Implementierung der sequenziellen Steuerung etabliert.

Die Steuerung in Form von Zustandsautomaten, wird in der vierten Entwurfssicht entwickelt. Ein Zustandsautoamt ist eine Verhaltensbeschreibung aus Zuständen und Übergängen und dient hier dem Entwurf logischer Steuersequenzen. Die im Vorfeld identifizierten Zustände werden in einen Entwurf verteilter Zustandsautomaten überführt. Diese werden in jedem Subsystem in gleicher Struktur angesiedelt. Das bedeutet, dass die spätere eingebettete Steuerungssoftware in gleicher Struktur auf lokalen Steuergeräten liegt. Durch diese Form des Steuerungsentwurfs entsteht eine leicht zu pflegende Struktur mit wenigen Schnittstellen nach außen. Der konkrete Entwurf der Zustandsautomaten erfolgt mittels einer Reihe von Zustandsdiagrammen, die je eine Betriebsart darstellen. In diesen werden Zustände und Zustandsübergänge modelliert. Zum Nachweis der Modelltransformationen wird als Anwendungsfall beispielhaft die Betriebsart „Startbetrieb“ betrachtet:

- Die Struktur der Zustandsautomaten wird in SysML auf der Basis der Subsystemaufteilung aus der Funktionsarchitektur definiert. Nach dem so entworfenen Muster wird ein Prototyp in der Matlab-Toolbox „Stateflow“ implementiert.
- Für den Kaltstartfall wird ein physikalisches Modell des Aufheizverhaltens für Brennstoffzelle und Batterie aufgebaut, welches physikalische Betrachtungen mit dem diskreten Zustandsautomaten koppelt.
- Unter Nutzung einer vorgegebenen Startstrategie wird dann untersucht, wie ein Kaltstart ab -20 °C abläuft und wie die ereignisgesteuerten Zustandsautomaten auf definierte Schwellwerte reagieren.
- Für die physikalische Betrachtung wird nachgewiesen, dass unter Nutzung von Zuheizern eine eingeschränkte Fahrfreigabe bei 25 % der Systemleistung bei 1,85 s und eine volle Fahrfreigabe bei 50 % der Systemleistung bei 28,8 s möglich sind.
- Die Auswertung der Schaltereignisse zeigt alle erwarteten Systemreaktion und bestätigt die Korrektheit des Entwurfs der Steuerlogik in Übereinstimmung mit den zuvor definierten logischen Abläufen.

An konkreten Analysen einzelner Betriebsarten wird damit nach der Definition der Systementwicklungsmethodik ein Ausführungsbeispiel für alle Entwicklungsschritte der in dieser Arbeit definierten vier Entwurfssichten aufgezeigt. Durch den Nachweis der geschlossenen Entwurfskette wird deutlich, dass sich mit relativ einfachen Mitteln neben der strukturellen Definition des Systems (Systemarchitektur) und der physikalischen Spezifikation auch der Entwurf der Steuerung frühzeitig untersuchen lässt. Die hier beschriebene Entwicklung der Steuerung über SysML-Zustandsdiagramme geschieht in der gleichen Anwendung wie die davor durchgeführte Funktionsanalyse. Damit wird ein geschlossener, nachvollziehbarer Entwurf gewährleistet. Die Erprobung des Steuerungsverhaltens in der Simulation mit physikalischen Anteilen ist außerdem eine schnelle Methode um frühzeitig und effizient die Einhaltung von Anforderungen zu überprüfen und diese Anforderungen gegebenenfalls zu überarbeiten.

Die frühen Phasen der Systemauslegung sind nach der Erprobung der Zustandsautomaten für das beschriebene Anwendungsbeispiel vollständig in allen vier Entwurfssichten durchgeführt. Tabelle 23 zeigt eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse:

Betrachtungsfelder	Schwerpunkte der Betrachtung	Wesentliche Ergebnisse
Anforderungs-analyse	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständiger Modellaufbau • Gründe für iterative Vorgehensweisen • Struktur für Systemlastenheft 	<ul style="list-style-type: none"> • Modell aller relevanten Anwendungsfälle • Vollständig zurückverfolgbare Anforderungsstruktur und Systemlastenheft
Vorauslegung auf Systemebene	<ul style="list-style-type: none"> • Designentscheidungen aus Anforderungen • Leistungsauslegung und Hybridisierung • Auswirkung der Auslegung auf Systemkosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Antriebsvorauslegung auf 90 kW Antriebsleistung und 200 Nm Drehmoment • Batterie vorauslegung mit 2kWh Energieinhalt
Funktionsmodellierung und Architekturentwurf	<ul style="list-style-type: none"> • Ableitung der Funktionsmodellierung • Algorithmusentwurf zur Subsystemdefinition • Vollständige Modellierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierungsmethode für Funktionsmodelle • Vollständige Werkzeugkette • Entwurf der kompletten Systemarchitektur
Physikalische Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Modellstruktur nach physikalischen Wirkketten • Simulationsmodell mit systematischer Parametervariation 	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständig abgeleitetes Simulationsmodell • Vollständige physikalische Parametrierung • Umfangreiche Sensitivitätsanalyse
Logisches Systemverhalten	<ul style="list-style-type: none"> • Logische Abläufe aus der Use-Case-Definition • Modellierung in SysML 	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständige Werkzeugkette • Ablaufplanung für den Startfall • Untersuchung der Subsystem-Interaktion
Steuerlogik	<ul style="list-style-type: none"> • Ableitung von Steuerlogiken • Entwurf von Zustandsautomaten und Co-Simulation mit physikalischem Modell 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulationsmodell mit Steuerlogik und physikalischem Anteil für den Kaltstartfall • Systemverhalten mit elektrischen Zuheizern

Tabelle 23: Betrachtungsschwerpunkte und Ergebnisse der Anwendung

10.2 Ausblick

Die neu entwickelte Methodik eröffnet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten zur Straffung und Vereinfachung der Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme. Da hier elektrische Fahrzeugantriebe mit Brennstoffzellen im Mittelpunkt der Betrachtung standen, lassen sich insbesondere für die Entwicklung solcher Systeme wertvolle Schlussfolgerungen ziehen.

Es ist ersichtlich, dass die vier Sichten des modellbasierten Entwurfs erwartungsgemäß an vielen Stellen voneinander abhängig sind. Nur durch eine iterative Vorgehensweise kann im Wechsel zwischen den vier Entwurfssichten ein zentrales Systemmodell schrittweise, nach Bedarf auch von mehreren Entwicklern parallel bearbeitet und verbessert werden.

Für den Systementwurf ergeben sich durch die hier entwickelte Methodik nachhaltige Verbesserungen inhaltlicher und methodischer Art:

- Systemteile lassen sich mit der dargestellten SysML-Notation in den Perspektiven Struktur, Verhalten und Anforderungen modellieren.
- Dadurch wird die Nachverfolgbarkeit von Anforderungen bis in die Entwurfsschritte ermöglicht. Dies ist ein zentrales Ziel der frühen Systementwicklungsphasen.
- Schnittstellen zwischen den Subsystemen können aus einer übergeordneten Systemperspektive definiert werden.
- Zusammen mit den aus der Funktionsarchitektur bekannten funktionalen Inhalten der Systeme lässt sich damit eine vollständige Subsystemspezifikation erstellen, die es ermöglicht, deren Entwicklungsabläufe zu parallelisieren.
- Zur Abstimmung zwischen den Subsystemen kann im Entwicklungsprozess eine zentrale Verfolgung der Subsystemschnittstellen etabliert werden. Dadurch lassen sich Inkonsistenzen zwischen von verschiedenen Teams parallel entwickelten Subsystemen, vermeiden.
- Das hier eingeführte architekturzentrierte Arbeiten liefert eine Basis für die Darstellung und die Verwaltung von Produktvarianten durch Konfiguration verschiedener Funktionsinhalte.
- Die frühe Phase der Anforderungsentwicklung kann mit den dargestellten Werkzeugen auch ohne detaillierte Kundenanforderungen realisiert werden. Dabei entsteht eine Anzahl und ein Grad der Vollständigkeit der Anforderungen, die der Entwicklungsaufgabe angemessen ist.

- Die Kopplung physikalischer Modellierungen an die Strukturmodelle der SysML erlaubt mit dem hier beschriebenen Simulationsverfahren eine schnelle Entwurfsraumuntersuchung und einen hohen Informationsgewinn auf der Basis relativ einfacher Simulationsmodelle aus Wirkketten.
- Durch den weitgehenden Verzicht auf Zusatzdokumente, die Parallelisierung von Entwicklungsschritten und die Komplexitätsreduktion der Modellierung können Aufwände der Spezifikation und Vorauslegung reduziert und eine Effizienzsteigerung erreicht werden.

Eine unmittelbare Anwendung der Methodik ist in frühen Entwicklungsphasen vorstellbar, um das zu erwartende Potential von Systemlösungen nach einer anfangs definierten Grobspezifikation zu untersuchen. So lässt sich mittels zunächst relativ einfacher Modellierung in einem ersten Schritt die prinzipielle Eignung einer mechatronischen Lösung für den angestrebten Zweck überprüfen. In weiteren Modellierungsiterationen kann in Sensitivitätsanalysen gezielt der Einfluss von Systemverbesserungen und/oder Systemerweiterungen untersucht werden.

Die Änderungen der Anforderungen an das Brennstoffzellensystem im Falle einer angepassten Betriebsstrategie mit optimiertem Wirkungsgrad (eine Leistungsreduktion um ca. 25 %, siehe 7.7.2), zeigt beispielsweise auf, dass eine Strategie der Verbrauchsminderung auch weitere Einsparungen durch eine Verkleinerung aller wesentlichen Systeme mit sich bringt. Dieses Anwendungsbeispiel unterstreicht das Potenzial der hier entwickelten Methodik.

Die gewählte Art der physikalischen Modellbildung erlaubt außerdem eine Bewertung von Änderungseinflüssen bei veränderten Anforderungen. So lassen sich unter anderem die Erhöhung der Anforderungen resultierend aus verschärften Umweltbedingungen darstellen und die sich daraus ergebende Kostenerhöhung bewerten. Hierzu sei auf die Beispiele zur Untersuchung des Anwendungsbeispiels in der Sensitivitätsanalyse in 7.7 verwiesen. Ebenso ist denkbar, solche sowie ähnliche Ergebnisse aus Untersuchungen des Parameterraumes zu nutzen, um die optimale Allokation zusätzlicher Mittel eines Entwicklungsbudget zu bestimmen. Dies alles unter der bestehenden Prämisse einer vollständigen Zurückverfolgbarkeit aller Produktanforderungen.

Solche und ähnliche Ergebnisse lassen sich mit dem in dieser Arbeit erstellten Instrumentarium erzielen. Um die Einsetzbarkeit der dargestellten Methodik in der Entwicklungspraxis weiter auszubauen, können insbesondere Teile der implementierten Werkzeugkette weiter verbessert werden. Beim Entwurf der Funktionsarchitektur z.B., können weiterentwickelte Optimierungsansätze dazu verwendet werden, um auch die tieferen Funktionsebenen automatisiert zu gruppieren.

Weiterführende Arbeiten sollten die Thematik der Varianten in die Anwendung der Methodik integrieren. Die Weiterentwicklung hin zur Behandlung einer Systemkonfiguration auf Funktionsebene und zur automatischen Wirkungsanalyse auf Funktionsinhalte und Parametrierung ist ein wichtiges zukünftiges Arbeitsgebiet.

Des Weiteren kann der Betrachtungsrahmen der Methodik erweitert werden. Wichtige Ausbaustufen sind insbesondere die Spezifikation von Komponenten innerhalb der Subsysteme und die Ableitung einer Softwarearchitektur für die Steuerungs- und Regelsysteme auf der Basis der Funktionsarchitektur.

11 Anhang A

11.1 Bekannte Prozesse und Standards der Systementwicklung

Die folgenden Abschnitte enthalten eine kurze Übersicht über einige bedeutende Beispiele für Entwicklungsprozesse, die für diese Arbeit evaluiert wurden.

Der IEEE-**“Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process”** IEEE Std 1220-1998 [60]. Dieser definiert Entwicklungsetappen nach einem Lebenszyklus, der in Abbildung 155 dargestellt ist. Die enthaltenen Phasen gleichen im Wesentlichen der Beschreibung aus 2.4.2. Relevant ist die hohe Gewichtung der frühen Definition- und Konzeptphasen. IEEE 1220-1998 ist generell auf die konkreten Entwicklungsphasen konzentriert und liefert für diese definierte Ablaufschritte.

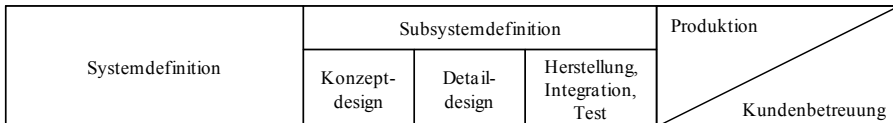


Abbildung 155: Systemlebenszyklus nach IEEE Std 1220-1998 [60]

Das **„Systems Engineering Handbook“** der NASA [2]. Das Handbuch ist keine einfache Prozessbeschreibung, sondern eine umfassende Sammlung von Richtlinien und bewährten Praktiken, die unterschiedlichen NASA-Dokumenten und Richtlinien entnommen sind. Es enthält detaillierte Beschreibungen technischer Management-Prozesse und Schritte von Systemdesign und Produktrealisierung. Die Inhalte sind in Abbildung 156 dargestellt. Relevant ist wiederum der Fokus auf die Konzeptphase und die Anforderungsentwicklung als zentrale Teile der Systementwicklung.

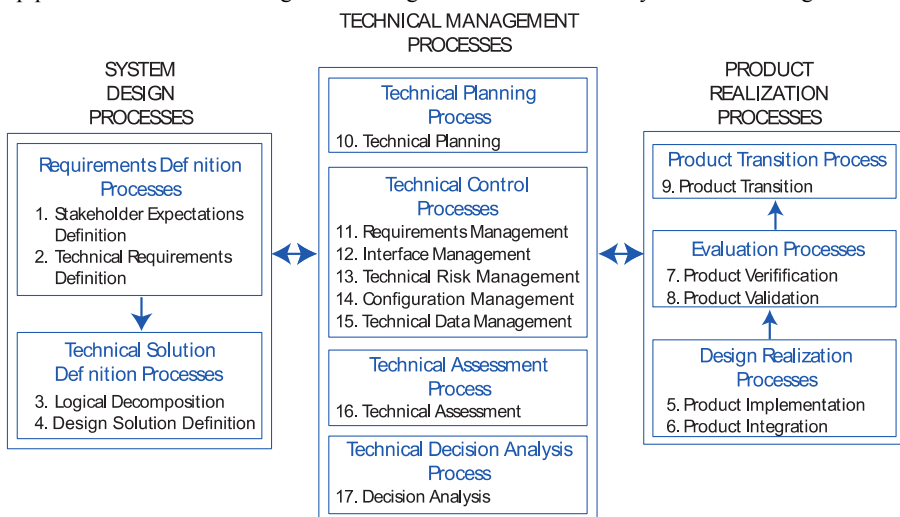


Abbildung 156: Teilprozesse des Systementwurfs nach [2]

Der **ISO/IEC-Standard 15288 „Systems and software engineering“** [61]. Dieser basiert in Teilen auf IEEE Std 1220-1998, ist aber deutlich weiter gefasst. Neben den technischen Prozessschritten werden auch Beschaffungs- und Projektprozesse beschrieben. Die technischen Prozessschritte umfassen Phasen vom Konzept bis zur Verwendung und Entsorgung. Der Detaillierungsgrad ist relativ gering.

Die **VDI Richtlinie „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“** [186]. Sie enthält ein dreiteiliges Vorgehensmodell aus Mikrozyklus, Makrozyklus und Prozessbausteinen. Erwähnenswert ist die Beschreibung des V-Modells als Makrozyklus, der mit zunehmender Produktreife mehrfach durchlaufen wird. Dies trägt dem iterativen Charakter des V-Modells Rechnung.

11.2 Bekannte modellbasierte Systementwicklungsmethoden

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten modellbasierten Systementwicklungsmethoden werden im Folgenden kurz erläutert.

IBM Rational Harmony SE ist eine Methodik für die Softwareentwicklung, die auf der Beschreibungsnotation SysML und dem Werkzeug „Harmony“ basiert [187]. Sie ist unterteilt in einen Systementwicklungsteil und einen Teil der Entwicklung eingebetteter Echtzeit-Systeme. Das Vorgehen orientiert sich weitestgehend am V-Modell. Der Systementwicklungsteil ist unterteilt in die Phasen Anforderungsanalyse, Systemanalyse und Designsynthese. Abbildung 157 stellt diese Phasen dar.

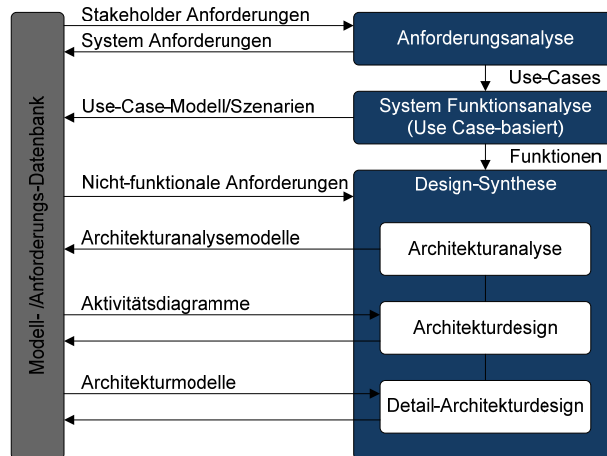


Abbildung 157: Systementwicklungsablauf nach IBM Rational Harmony SE [187]

Die zwei wichtigsten Details sind der Fokus auf das architekturzentrierte Arbeiten und auf die Modelldatenbank. Die Architektur dient als Schnittstelle zum nachgeschalteten Softwareentwicklungsprozess. Die Modelldatenbank wird in jedem Schritt mit immer detaillierteren Modellen gefüllt. Der inhaltliche Kern der Identifikation von Funktionen und Systemzuständen und deren Anwendung auf eine Subsystemstruktur passt sehr gut auf die in dieser Arbeit betrachteten Antriebssysteme.

Die „Vitech Model-Based System Engineering Methodology“ basiert auf vier integrierten Entwicklungsdomänen, die alle über eine zentrale Modelldatenbank, ein sogenanntes Design-Repository integriert sind [5]. Dieses Konzept ist in Abbildung 158 dargestellt:

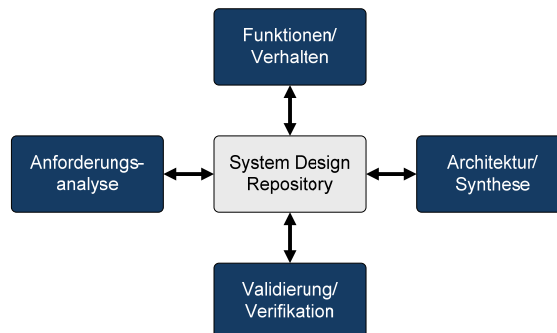


Abbildung 158: Domänen der Vitech-MBSE-Methodik nach [5]

Eine modellbasierte Notation wird bei diesem Ansatz genutzt um Modelle aller Domänen auszutauschen. Diese sollen sogar automatisiert auf Konsistenz prüfbar sein. Neben der zentralen Bedeutung des Design Repository ist ein Grundmerkmal der Methodik die iterative Wiederholung der zentralen Arbeitsschritte. Diese werden auf jeder Fortschrittsstufe oder Systemebene komplett durchlaufen. Dadurch kann man frühe Reviews einbinden und die Methodik skaliert gut zur Verwendung auf verschiedenen Systemebenen (Antriebsstrang, Steuergerät).

Die **JPL State Analysis** wurde entwickelt um konventionelle Methoden der Funktionszerlegung um Aspekte der dynamischen Verhaltensdefinition zu erweitern [188]. Sie basiert auf der Definition einer Regelarchitektur basierend auf Zustandsautomaten und Zustandsvariablen, die das System beschreiben. Dadurch soll insbesondere die Brücke zwischen Anforderungen auf Systemebene und dem Entwurf der Kontrollsoftware geschlossen werden. Auch bei dieser Methode wird die gesamte Information in einer Datenbank gesammelt. Abbildung 159 zeigt die Darstellung der Kontrollarchitektur aus [188].

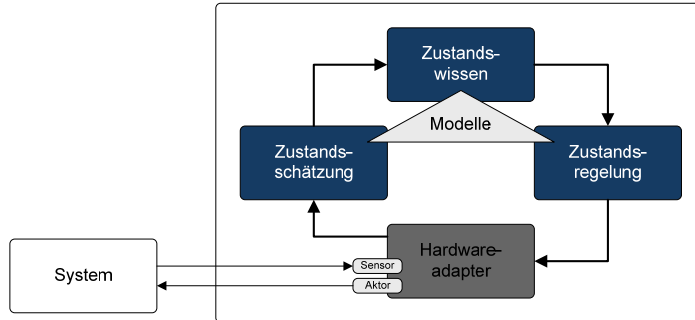


Abbildung 159: Zustandsbasierte Regelarchitektur [188]

Unter Verhaltensmodellierung wird beim JPL-Ansatz die Erfassung aller Zustandsvariablen des Systems und der kausalen Zusammenhänge zwischen den Variablen angesehen. Zustandsänderungen ergeben sich durch andere Zustände oder durch Kommandos des Regelsystems.

Im Rahmen des Verbundprojekts **REMSes** wurde ein Praxisleitfaden für das modellbasierte Requirements Engineering softwareintensiver, eingebetteter Systeme erstellt [14]. Der Fokus liegt dabei eher auf der Definition des Softwareanteils. Die Hauptmerkmale der Methodik sind die Strukturierungsprinzipien auf drei Abstraktionsebenen, drei Artefaktklassen sowie sechs Modellierungsansätze, die der Reihe nach abgearbeitet werden. Dieses Schema ist in Abbildung 160 dargestellt:

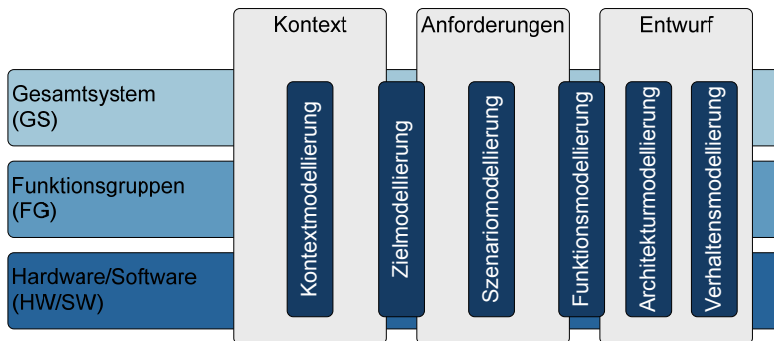


Abbildung 160: Übersicht über Modellierungsansätze (dunkelblau), Abstraktionsebenen (blau) und Artefaktklassen (grau) der REMSes-Methodik [14]

Auf der Gesamtsystemebene erfolgt eine funktionale Zerlegung des Systems. Die Funktionsgruppen sind eine hierarchische Verfeinerung in logische Einheiten, die auf der Hardware/Software-Ebene auf Hardware-Komponenten zugeordnet werden. Interessant bei der Wahl der Modellierungsansätze ist die Betrachtung des Systems von außen nach innen. Dabei werden zunächst Systemschnittstellen definiert. Danach werden die dem Systemnutzer zur Verfügung gestellten Interaktionen, bzw. für den Systemnutzer sichtbare Funktionalitäten modelliert [14].

Die **AutoMoDe -Automotive Model Based Development Methode** ist ein Ansatz zur modellbasierten Modellierung und Synthese eingebetteter Softwaresysteme im Automobilbereich [189]. Die wichtigsten Merkmale der Methode sind ein integriertes Produktmodell, das mehrere Sichten integrieren kann, sowie ein Prozessmodell. Dieses ist aufgeteilt auf vier Ebenen mit entsprechenden

Transformationsschritten. Die Ebenen und die in ihnen zu definierenden Modellelemente zeigt Abbildung 161:

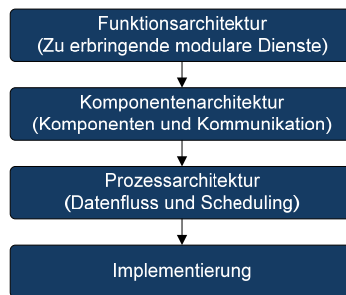


Abbildung 161: Prozessebenen und zu definierende Modellelemente in AutoMoDe

Auch bei dieser Methode liegt der Fokus auf der Softwaredefinition und weniger auf der Systemstrukturierung z.B. eines übergeordneten kompletten Antriebsstrangs. Die einzelnen Modellierungsschritte lassen sich aber übertragen. Mit der Prozessarchitektur ist über das Scheduling auch eine Verhaltensbeschreibung enthalten.

Der SYSMOD – Systems Modeling Process ist ein Ansatz zur modellbasierten Spezifikation und zur Definition der funktionalen und physikalischen Architektur [19]. Er enthält detaillierte Definitionen zu Entwicklungsschritten mit entsprechenden Eingangs- und Ausgangsmodellen. Da die Beschreibung vollständig auf der Beschreibungsnotation SysML basiert, lassen sich enthaltene Modellierungstechniken leicht übertragen oder anpassen. Im SYSMOD liegt wiederum ein Fokus auf der Verhaltensmodellierung, der Use-Case-Modellierung und der schrittweisen Zerlegung von Modellen. Insbesondere die Überführung von Anwendungsfällen (Use-Cases) in Systemabläufe ist lückenlos enthalten. In Abbildung 162 ist beispielhaft die Zerlegung von Use-Cases in System-Aktivitäten dargestellt:

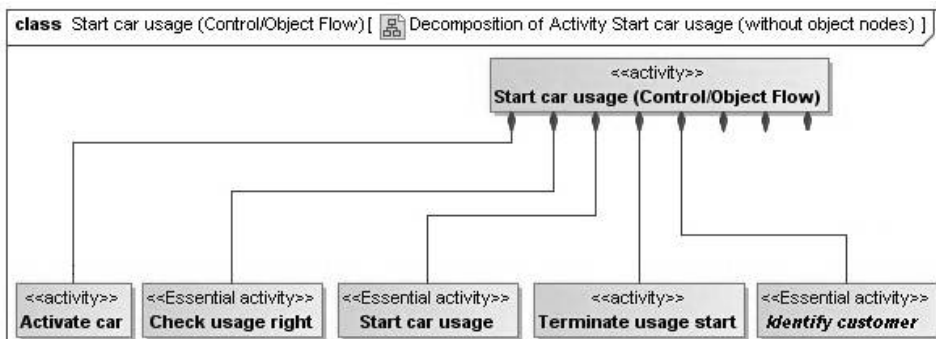


Abbildung 162: Zerlegung in Aktivitäten am Beispiel einer Fahrzeugverwendung [46]

Zerlegungstechniken dieser Art können auch bei der Funktionsanalyse des Antriebsstrangs verwendet werden. Die verwendeten Modellelemente sind in der Beschreibung in 2.6.5 detaillierter beschrieben.

12 Anhang B

12.1 Brennstoffzellen – Aufbau und Wirkungsweise

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die die chemisch gebundene Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie und Wärme wandeln können. Im Unterschied zu Batterien werden die Reaktanden kontinuierlich zugeführt. Für Fahrzeuganwendungen werden in der Regel Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM) verwendet. Daher wird in den folgenden Abschnitten dieser Typ beschrieben.

Eine Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden (Anode und Kathode), die durch eine Elektrolytmembran getrennt sind. Die Membran ist nur für Ionen durchlässig. Dadurch lässt sich eine chemische Reaktion herbeiführen, die in Abbildung 19 dargestellt ist:

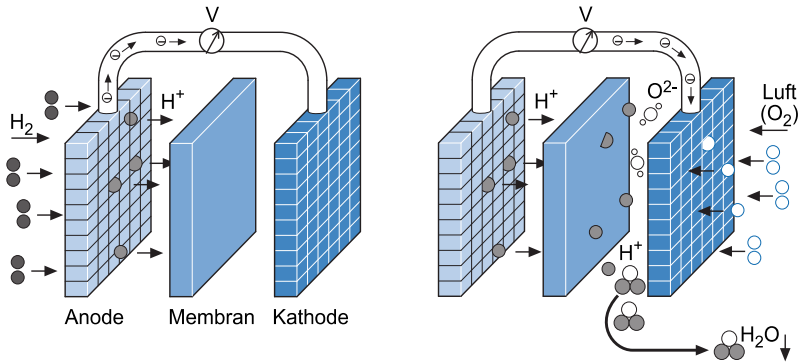
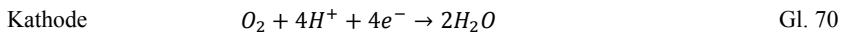
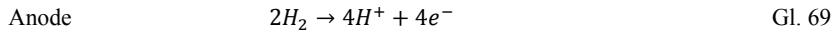
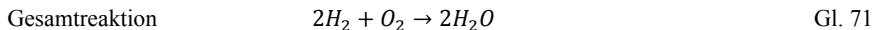


Abbildung 163: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle [47]

An der Anode wird Wasserstoff zu H^+ -Ionen und Elektronen oxidiert. Die H^+ -Ionen können durch die Elektrolytmembran zur Kathode gelangen. Die Elektronen werden über einen äußeren Stromkreis geführt. An der Kathode wird mit den Elektronen der dort zugeführte Sauerstoff reduziert [47]. Die Halbreaktionen lauten:



Die Reaktionsschritte bilden zusammen eine sogenannte kalte Verbrennung, da die Reaktanden räumlich getrennt bleiben [47]:



Zur technischen Realisierung dieser Reaktion wird eine Reihe von Komponenten über einander geschichtet. Diese sind in Abbildung 164 dargestellt und in Tabelle 24 erläutert:

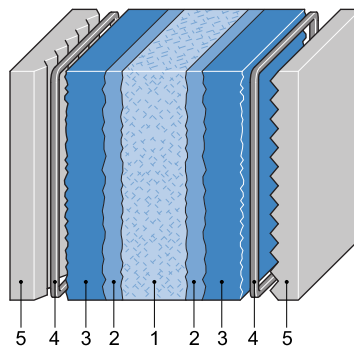


Abbildung 164: Schematischer Aufbau einer einzelnen Brennstoffzelle [47]

1	Membran	Das meistverwendete Membranmaterial ist Nafion. Es besteht aus einem PTFE-Grundgerüst, welches mit Sulphonketten bestückt ist. Diese Seitenketten halten Feuchtigkeit an dem sonst hydrophoben Material und ermöglichen dadurch die Protonenleitfähigkeit.
2	Elektroden und Katalysator	Die Elektroden bestehen aus einem feinkörnigen Kohlenstoffmaterial. Dieser dient als Träger für Platinpartikel, die als Katalysator der Reaktion verwendet werden. Zur Maximierung der Oberfläche müssen diese Partikel möglichst klein sein. Der Dreiphasenkontakt zwischen Platin, Wasser und dem zugeführten Wasserstoff muss auf einer möglichst großen Oberfläche stattfinden. Die Elektroden werden in der Regel direkt auf der Membran angebracht und bilden eine sogenannte Membran-Elektroden-Einheit (MEA).
3	Gasdiffusionslagen	Die Gasdiffusionslage, üblicherweise ein Kohlenstoffvlies hat die Aufgabe die Reaktanden gleichmäßig über die Oberfläche der MEA zu verteilen. Darüber hinaus müssen sie den elektrischen Kontakt zwischen den Katalysatorpartikeln zu den Bipolarplatten gewährleisten und das Produktwasser abführen.
4	Dichtungen	Die Dichtungen verhindern den Austritt der Reaktionsgase nach außen.
5	Bipolarplatten	Die Bipolarplatten dienen der Zufuhr der Reaktanden über die integrierten Gaskanäle und der elektrischen Kontaktierung über ihre gesamte Oberfläche. Sie werden aus graphitgefülltem Kunststoff oder aus Metall gefertigt. Die Bipolarplatten ermöglichen den Aufbau von Brennstoffzellenstapeln, in dem sie auf beiden Seiten mit Gaskanälen durchsetzt sind und somit eine Kathoden- und eine Anodenseite aufweisen. Sie stellen außerdem die mechanische Stabilität und den Transport des Kühlmittels in zusätzlichen Kühlmittelkanälen sicher.

Tabelle 24: Elemente der Brennstoffzellen [135]

Die Spannung, die durch den Elektronenfluss auf dem äußeren Stromkreis entsteht, lässt sich über die freie Enthalpie der Reaktion bestimmen. Für die freie molare Reaktionsenthalpie gilt nach [135]:

$$\text{Freie molare Reaktionsenthalpie} \quad \bar{g}_f = \bar{h}_f - T\bar{s} \quad \text{Gl. 72}$$

Mit: \bar{h}_f : Molare Enthalpie \bar{s} : Molare Entropie T: Temperatur

Die thermodynamischen Größen sind temperaturabhängig und lassen sich entsprechenden Tabellenwerken entnehmen, z.B. [153]. Nach [135] ist für ein reversibles System die elektrische Arbeit gleich der freien Reaktionsenthalpie. Damit ergibt sich bei Normbedingungen das Standardpotential einer Zelle nach dem Faraday-Gesetz [136]:

$$\text{Standardpotential} \quad E^0 = \frac{-\Delta G^0}{2F} \quad \text{Gl. 73}$$

Mit: ΔG^0 : Freie Reaktionsenthalpie bei Standardbedingungen F: Faraday-Konstante

Fällt das Produktwasser in flüssiger Form an, gilt für die Änderung der freien molaren Reaktionsenthalpie:

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (\bar{g}_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(\bar{g}_f)_{\text{O}_2} = -237,3 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \text{Gl. 74}$$

Damit ergibt sich ein Standardpotential von 1,229 V. Die zusätzliche Beachtung der Reaktions-entropie aus Gl. 72 ergibt die Heizwertspannung. Diese liegt bei gleichen Bedingungen bei 1,48 V (1,253 bei gasförmigem Produktwasser). Die Heizwertspannung ist nach [136] eine theoretische Größe, die nur zur Berechnung des Wirkungsgrads gebraucht wird. Für den thermodynamischen Wirkungsgrad der Zelle ergibt sich demnach:

Thermodynamischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} = \frac{E^0}{E_H^0}$	Gl. 75
-----------------------------------	---	--------

Mit: ΔG^0 : Freie Reaktionsenthalpie bei Standardbedingungen E^0 : Standardpotential
 ΔH^0 : Enthalpie bei Standardbedingungen E_H^0 : Heizwertspannung

Für die Annahme flüssigen Produktwassers gilt ein Wert von ca. 83 % (98 % bei gasförmigem Produktwasser). Für die Betrachtung einer Einzelzelle ergibt sich nach [135] unter der zusätzlichen Betrachtung eines technischen Nutzungsgrads (Umgesetzter Kraftstoff/Zugeführter Kraftstoff) demnach der Zellwirkungsgrad:

Zellwirkungsgrad	$\eta_{zelle} = \mu_f \cdot \frac{E_Z}{E_H}$	Gl. 76
------------------	--	--------

Mit: E_Z : Zellspannung E_H : Heizwertspannung μ_f : Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad liegt nach [135] bei etwa 95 %. Die beschriebenen Spannungen einer Einzelzelle sind in Abbildung 165 in Abhängigkeit der Stromdichte dargestellt. Diese sogenannte Polarisationskennlinie weist weitere Spannungsverluste auf, die den charakteristischen Verlauf der Kennlinie erzeugen.

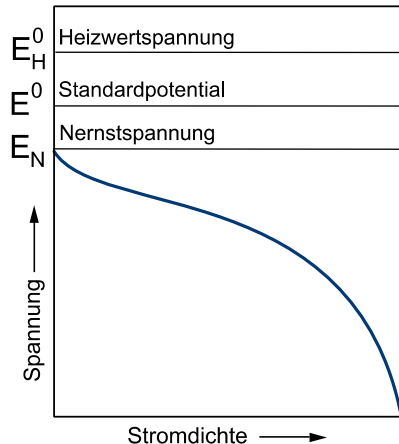


Abbildung 165: Zellspannung (hell) und Zellwirkungsgrad (dunkel) einer einzelnen Brennstoffzelle

Ohne Stromfluss stellt sich die Leerlaufspannung ein. Aufgrund von Abweichungen vom thermodynamischen Standardzustand ist diese niedriger als die theoretisch erreichbare Zellspannung.

- Bei niedrigen Stromdichten zeigt sich zunächst ein schneller Abfall der Zellspannung. Dies liegt an der sogenannten Aktivierungsüberspannung. Diese liegt an Hemmungen des Ladungsdurchtritts an den Elektrodengrenzflächen. Dadurch wird die gesamte Reaktion gehemmt [135].
- Bei mittleren Stromdichten zeigt sich der lineare ohmsche Spannungsverlust. Dieser liegt an Widerständen in den Elektroden, im Elektrolyten und an den Kontaktstellen.
- Bei hohen Stromdichten zeigt sich wieder ein nichtlinearer Spannungsabfall. Diese sogenannte Konzentrationsüberspannung entsteht durch Widerstände beim Transport der Reaktanden an die Elektrodenoberfläche. Durch die in diesem Bereich herrschende hohe Reaktionsrate entstehen damit eine zu geringe Konzentration und ein Abfall der Spannung.

Um die für Antriebssysteme notwendigen Spannungen zu erzielen, müssen die Zellen zu einem sogenannten Brennstoffzellenstapel (Stack) in Reihe geschaltet werden. Die wirkungsvollste Art und Weise ist die Reihenschaltungen über die bereits beschriebenen Bipolarplatten. Durch den flächigen Kontakt wird der Durchtrittswiderstand an den Grenzflächen minimiert. Gleichzeitig können die Bipolarplatten die Gasflüsse der beiden Reaktanden wirkungsvoll trennen. Abbildung 166 zeigt den Aufbau einer Einzelzelle aus Bipolarplatten und Membran-Elektroden-Einheit, sowie den resultierenden Brennstoffzellenstapel.

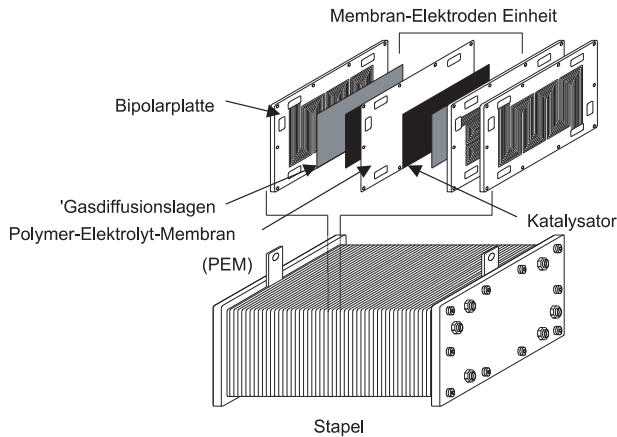


Abbildung 166: Aufbau einer Einzelzelle und Reihenschaltung zum Zellstapel [190]

Der Brennstoffzellenstapel selbst verfügt über keinerlei bewegliche Teile und einen hohen Wirkungsgrad. Für den Betrieb als Energiequelle im elektrischen Antriebsstrang wird jedoch eine Reihe von Peripheriekomponenten benötigt.

12.2 Brennstoffzellensysteme im Fahrzeug

Für den Betrieb des Brennstoffzellenstapels werden zusätzliche Systemkomponenten benötigt, die die Versorgung des Brennstoffzellenstapels mit den Reaktanden und dem Kühlmedium sicherstellen. Außerdem werden Komponenten für die elektrische Anbindung benötigt. Die Komponenten und ihre Kernaufgaben werden im Folgenden dargestellt. Dazu wird zunächst eine beispielhafte Systemtopologie dargestellt. Auf dieser Basis werden die benötigte Systemfunktionalität und ihr Einfluss auf den Systembetrieb dargestellt. Danach werden beispielhafte Realisierungen der Komponenten beschrieben.

12.2.1 Topologien

Abbildung 167 zeigt exemplarisch ein Brennstoffzellensystem nach [47] und dessen Anbindung an den elektrischen Fahrzeugantrieb.

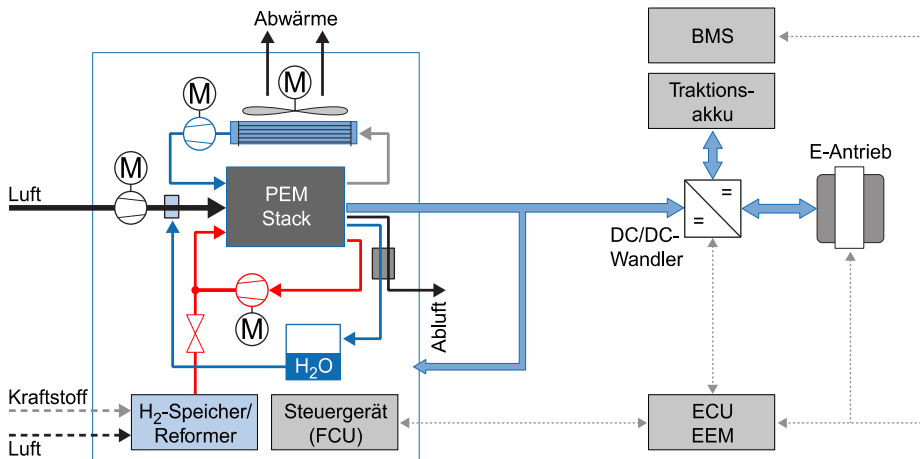


Abbildung 167: Brennstoffzellensystem im elektrischen Antriebsstrang [47]

- Die Versorgung mit Wasserstoff erfolgt aus einem Tank. Hierbei wird üblicherweise ein Wasserstoffüberschuss zugeführt. Mit dem dargestellten Rezirkulationspfad kann der Überschuss zurückgeführt und damit das Stöchiometrieverhältnis am Anodeneingang eingestellt werden.

- Die Versorgung mit Sauerstoff an der Kathode erfolgt über die Außenluft. Die Kathodenluft muss vor Eintritt in den Brennstoffzellenstapel befeuchtet werden, um die Ionenleitfähigkeit der Membran sicherzustellen.
- Ein Kühlkreislauf dient zur Abfuhr der Reaktionswärme. Das Kühlmittel, welches den Brennstoffzellenstapel durchströmt muss deionisiert werden, um die Katalysatorpartikel zu schützen.
- Der Anschluss an das elektrische Bordnetz des Fahrzeugs erfolgt in Abbildung 167 mit einem Wandler. Diese Komponente ist nicht zwingend erforderlich, kann aber zur Anhebung der Brennstoffzellenspannung verwendet werden.

Die genaue Topologie des Brennstoffzellensystems lässt sich stark variieren. Die grundlegenden Systemfunktionen und die zu ihrer Realisierung benötigten Systemkomponenten bleiben im Wesentlichen die Gleichen.

12.2.2 Wasserstoffversorgung und Rezirkulation

Der Wasserstoff wird üblicherweise in einem Hochdrucktank gespeichert. Eine erste Druckabsenkung erfolgt in einem Druckminderer. Die Dosierung in die Anode erfolgt über ein Dosierventil [138]. Der Einfluss des Anodendrucks lässt sich über die Nernst-Gleichung darstellen. Diese beschreibt die Abhängigkeit der reversiblen Zellspannung von Temperatur und Druck der Reaktanden. Nach [135] gilt:

$$\text{Elektrodenpotential} \quad E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad \text{Gl. 77}$$

Mit: E^0 : Standardelektrodenpotential

p : Partialdrücke

R : Gaskonstante

T : Temperatur

F : Faraday-Konstante

Es ist aus Gl. 84 leicht ersichtlich, dass eine Erhöhung des Wasserstoffpartialdrucks eine Erhöhung des Zellpotentials bewirkt. Darüber hinaus muss zur Vermeidung schädlicher Nebenreaktionen stets ein überstöchiometrischer Betrieb gewährleistet werden. Nach [136] nimmt die Wasserstoffkonzentration über der Kanallänge innerhalb der Zelle ab. Durch lokale Wasserstoffverarmung kommt es zu Wirkungsgradverluste oder sogar zu irreversiblen Schädigungen der Zelle. Detaillierte Ausführungen dazu, kann man [191] entnehmen.

Für die Rückführung des überschüssigen Wasserstoffs wird ein Rezirkulationspfad verwendet. Über diesen wird mittels Gebläsen oder Strahlpumpen das Stöchiometrieverhältnis am Anodeneingang eingeregelt. Die Rezirkulation sorgt außerdem für eine ausreichende Befeuchtung des Anodengases.

12.2.3 Sauerstoffversorgung und Kathodendruck

Die Bereitstellung des Oxidationsmediums an der Kathode ist außer dem direkten Einfluss auf die Zellreaktion auch relevant für den Wasserhaushalt der Brennstoffzelle. Nach Gl. 84 wirkt der Sauerstoffpartialdruck direkt auf das Elektrodenpotential. Es ergibt sich die in Abbildung 168 dargestellte Anhebung der Polarisationskennlinie:

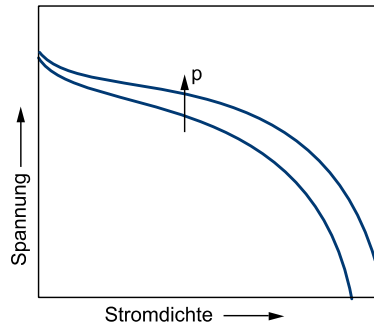


Abbildung 168: Erhöhung des Elektrodenpotentials durch Druckerhöhung

Eine Druckerhöhung senkt außerdem die Aktivierungsüberspannung auf der Kathodenseite. Bei mangelhafter Sauerstoffversorgung wird die Polarisationskennlinie absinken. Daher wird auch auf der Kathodenseite stets ein überstöchiometrischer Betrieb bei Drücken von 2 – 4 bar sichergestellt.

Die Druckerhöhung wird mit Gebläsen oder Strömungsmaschinen realisiert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Energie zum Betrieb der Strömungsmaschine direkt von der Brennstoffzelle bereitgestellt wird. Die Druckerhöhung ist daher nur in dem Bereich sinnvoll, indem die Potentialerhöhung den Verbrauch der Strömungsmaschine rechtfertigt. Nach [135] ist dies insbesondere bei kleinen Systemen nicht immer der Fall. Für die großen Systeme bis 100 kW, die in dieser Arbeit betrachtet werden, ist eine Druckerhöhung sinnvoll.

Der Einfluss der Druckerhöhung auf den Wasserhaushalt der Brennstoffzelle ergibt sich aus der Sättigungsmenge von Wasserdampf in der zugeführten Kathodenluft. Diese wird durch eine Temperaturerhöhung stark erhöht. Dadurch steigt nach [136] der Wasseraustrag am Kathodenausgang an. Aufgrund der hohen Verdampfungsenthalpie des Wassers wird dieser Effekt teilweise zur Kühlung eingesetzt. Allerdings können die Zellen bei zu hohem Wasseraustrag austrocknen [136]. Kondensation findet in einem Gas-Dampf-Gemisch immer dann statt, wenn der Dampfdruck über den Sättigungsdampfdruck steigt [153]:

$$\text{Kondensation} \quad p_D > p_{S,D} \quad \text{Gl. 78}$$

Mit: p_D : Dampfdruck $p_{S,D}$: Sättigungsdampfdruck

Den Effekt erhöhter Temperaturen liefert die Antoine-Gleichung [192]:

$$\text{Antoine-Gleichung} \quad p_{S,D} = e^{\left(11,74 - \frac{3863,84 \text{ K}}{-43,7 \text{ K} + T}\right)} \quad \text{Gl. 79}$$

Die resultierende Kennlinie ist in Abbildung 169 dargestellt. Sie beschreibt den Gleichgewichtszustand der flüssigen und der gasförmigen Phase.

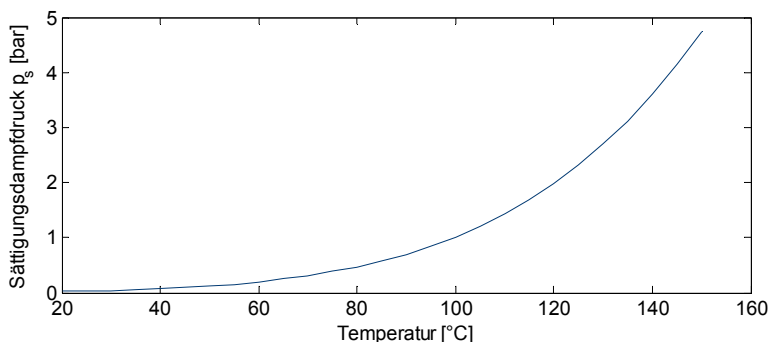


Abbildung 169: Sättigungsdampfdruck nach der Antoine-Gleichung

Bei steigender Temperatur wird zusätzliches Wasser verdampft. Eine isotherme Druckerhöhung kann nach [151] zur Kondensation führen, wenn der Dampfdruck größer als der Sättigungsdampfdruck wird. Nach [136] lässt sich die ausgetragene Wassermenge durch eine Druckerhöhung auf 2 - 4 bar stark reduzieren. Der erhöhte Druck erhöht den Dampfdruck am Kathodeneingang. Die relative Luftfeuchtigkeit nach Gl. 80 wird dadurch erhöht.

$$\text{Relative Luftfeuchtigkeit} \quad \varphi = \frac{p_D}{p_{S,D}} \quad \text{Gl. 80}$$

Die ausreichende Befeuchtung der Zelle wird dadurch vereinfacht, da nach [135] weniger Wasser zugeführt werden muss um die gleiche Feuchtigkeit zu realisieren.

12.2.4 Kathodenluftbefeuchtung

Für die Kathodenluftbefeuchtung kommen prinzipiell verschiedene Verfahren in Frage. In Abbildung 167 ist ein System mit Gas-Gas-Befeuchter dargestellt. Dabei wird das im Kathodenabgas enthaltene Produktwasser benutzt, um die Kathodenzuluft zu befeuchten. Dies kann beispielsweise mit einem

Bündel aus Trennmembranen erfolgen [47]. Über ein Bypass-Ventil kann dabei die Menge der zugeführten feuchten Luft für eine Feuchteregelung eingestellt werden [47]. Nach [135] kann Wasser aber auch direkt in die Kathodenluft oder den Brennstoffzellenstapel dosiert werden. Dabei kann die Verdampfungsenthalpie zur Zwischenkühlung der komprimierten Luft benutzt werden.

12.2.5 Spannungslage und Bordnetzanschluss

Die Klemmenspannung einer Brennstoffzelle ist abhängig vom eingestellten Laststrom. Aufgrund der charakteristischen Form der Spannungskennlinie ergibt sich der Leistungsverlauf, der im linken Teil von Abbildung 170 dargestellt ist. Es ist leicht erkennbar, dass die gleiche geforderte Leistung auf zwei verschiedenen Spannungslagen geliefert werden kann.

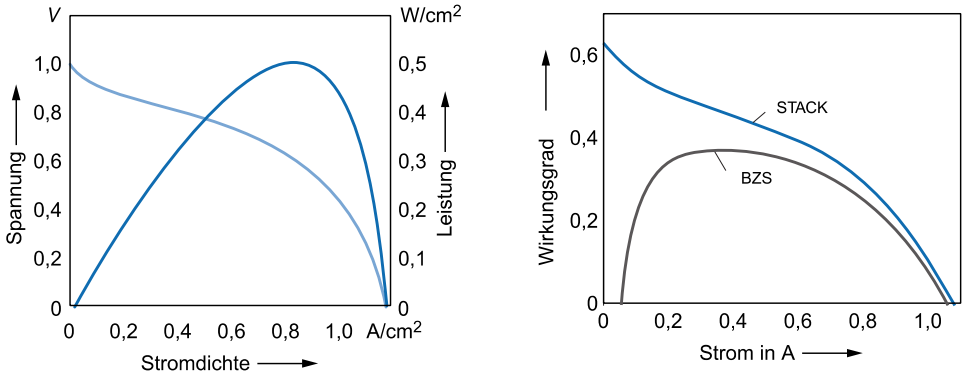


Abbildung 170: Leistungs- und Wirkungsgradverhaltens von Brennstoffzellen [47]

Dadurch ist es prinzipiell möglich den Laststrom so zu wählen, dass der Betriebspunkt mit dem günstigeren Gesamtwirkungsgrad eingestellt wird. Der rechte Teil von Abbildung 170 zeigt die Wirkungsgradverläufe des Brennstoffzellenstapels und des vollständigen Brennstoffzellensystems mit parasitären Peripheriekomponenten. In der Darstellung ergibt sich für niedrigere Stromdichten ein günstigerer Systemwirkungsgrad. Dieser Effekt ist in Abbildung 171 zusätzlich verdeutlicht. Die Abbildung zeigt die Leistungseinstellung für optimalen Wirkungsgrad und den Punkt maximaler Leistung.

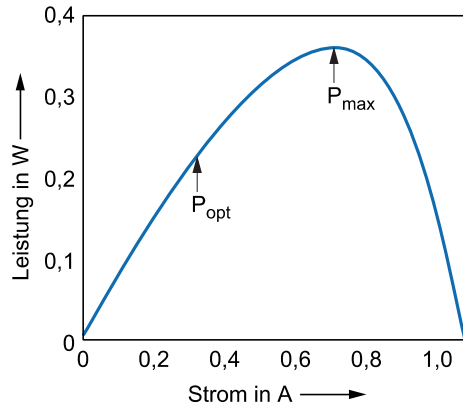


Abbildung 171: Betriebspunkte maximalen Wirkungsgrads und maximaler Leistung [47]

Um den Betriebspunkt variabel einzustellen, wird ein Stromsteller benötigt, der zwischen der Brennstoffzelle und dem Fahrzeugbordnetz angeordnet ist. Ein solcher Stromsteller nimmt die Brennstoffzellenleistung auf und gibt sie auf einer anderen Spannungslage wieder ab [136]. Ein Wandler ermöglicht darüber hinaus den Betrieb des angeschlossenen Fahrzeugantriebs bei konstanter Eingangsspannung. Auch dies kann von Vorteil sein. Der Einsatz und die Grundlagen der Spannungswandler werden in späteren Abschnitten beschrieben.

12.2.6 Abfuhr der Reaktionswärme und Temperatureinfluss

In Brennstoffzellensystemen liegt im Fahrzeugbetrieb ein Systemwirkungsgrad von etwa 50 % vor [135]. Dadurch entsteht eine nennenswerte Wärmeleistung, die im Fahrzeug abgeführt werden muss. Die Betriebstemperatur der Brennstoffzelle hat direkten Einfluss auf die Lage der Spannungskennlinie und den Wasserhaushalt der Membranen. Bei steigender Temperatur des Brennstoffzellenstapels sinken die ohmschen Widerstandsanteile. Außerdem nehmen die Überspannungen ab, wodurch die Kennlinie angehoben wird [136]. Um keine Inhomogenität über der Zelllänge zu erzeugen, wird das Temperaturgefälle vom Eingang bis zum Ausgang des Zellstapels auf etwa 10 °C beschränkt [193]. Der Transport des Kühlmittels erfolgt bei den hier betrachteten Leistungsklassen um 100 kW durch Kühlkanäle in den Bipolarplatten. Wegen des Kontakts mit den Elektroden muss das Kühlmittel in einem Ionentauscher deionisiert werden [47].

Nach [47] weisen Brennstoffzellensysteme nur einen geringen Abgaswärmestrom auf. Daher muss die Reaktionswärme fast vollständig über das Kühlmittel abgeführt werden. Die Reaktionswärme wird durch die Differenz zwischen tatsächlicher Zellspannung und theoretischer Heizwertspannung beschrieben. Nach [135] gilt:

$$\text{Reaktionswärme} \quad \dot{Q}_R = P_e \cdot \left(\frac{E_H}{E_Z} - 1 \right) \quad \text{Gl. 81}$$

Mit: P_e : Elektrische Leistung E_H : Heizwertspannung
 E_Z : Zellspannung

Für die Heizleistung, die das Kühlmittel dementsprechend aufnehmen muss, gilt:

$$\text{Heizleistung Kühlmittel} \quad \dot{Q}_{KW} = \dot{m}_{KW} \cdot c_{p\ KW} \cdot \Delta T \quad \text{Gl. 82}$$

Mit: \dot{m}_{KW} : Kühlwassermassenstrom $c_{p\ KW}$: Wärmekapazität des Kühlmittels
 ΔT : Temperaturdifferenz

Die Betriebstemperaturen der PEM-Brennstoffzellen liegen bei ca. 80 °C. In Fahrzeuganwendungen übliche Kühlsysteme werden bei etwa 90 °C betrieben. Durch das sehr kleine Temperaturgefälle zwischen der Betriebstemperatur des Zellstapels und der Kühlmitteltemperatur, müssen die Kühlerflächen vergleichsweise groß ausgeführt werden. Dies verdeutlicht Gl. 83:

$$\text{Wärmeabfuhr Kühler} \quad \dot{Q}_K = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta \quad \text{Gl. 83}$$

Mit: k : Wärmeübergangskoeffizient A : Heizwertspannung
 $\Delta \vartheta$: Logarithmische Temperaturdifferenz

Für den Betrieb im Fahrzeug kann dies bei unzureichender Anströmung eine Einschränkung für Höchstgeschwindigkeit und Heißlandbetrieb bedeuten. In Abbildung 172 ist eine exemplarische Kühlsystemtopologie aus [47] dargestellt. Die Darstellung zeigt eine in Fahrzeuganwendungen übliche Aufteilung auf zwei Kühlkreise. Ein Hochtemperaturkreislauf versorgt den Brennstoffzellenstapel. Für die Leistungselektronik und einige der Peripheriekomponenten wird in der Regel ein zusätzlicher Niedertemperaturkühlkreislauf benötigt. Nach [194] liegt die obere Kühlmitteltemperatur für Standardhalbleiter bei maximal 80 °C. Nach [47] wird der Niedertemperaturkreis bei 50...70 °C betrieben.

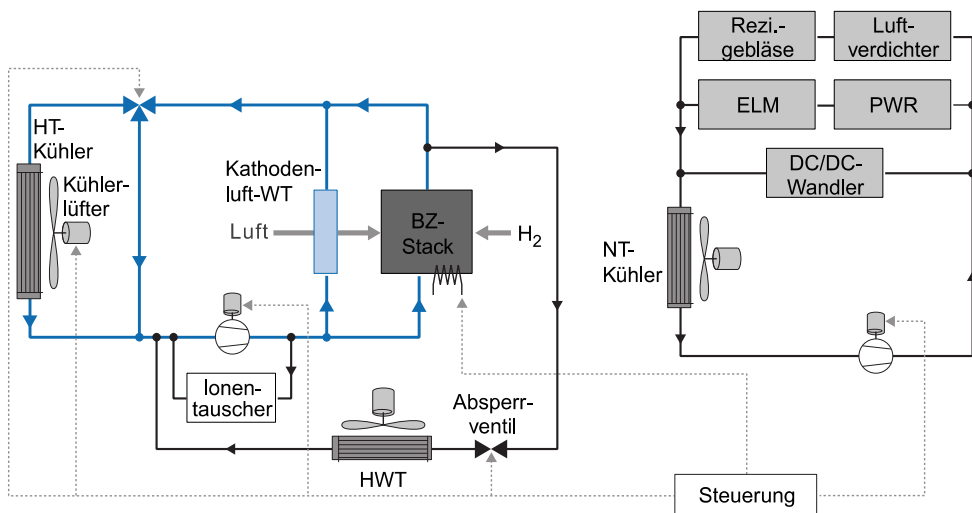


Abbildung 172: Zweikreis-Kühlsystemtopologie im elektrischen Antriebsstrang [47] (HWT: Heizungswärmetauscher; PWR: Pulswechselrichter; ELM: Elektrische Maschine; WT: Wärmetauscher)

An den Niedertemperaturkreislauf sind gemäß Abbildung 172 auch der Verdichter des Luftpfads, das Rezirkulationsgebläse des Wasserstoffpfads und die Antriebsmaschine angeschlossen.

Eine weitere Besonderheit für die Wärmeabfuhr in Brennstoffzellensystemen ist die Verwendung von elektrisch nichtleitendem Kühlmittel. Das Kühlmittel des Hochtemperaturkreislaufs steht in direktem Kontakt mit den Elektroden des Brennstoffzellenstapels. Daher wird das Kühlmittel in einem Ionentauscher deionisiert und die Leitfähigkeit überwacht.

12.3 Einsatzszenario der Fahrzeuganwendung

12.3.1 Anforderungen

Für die Anwendung im Fahrzeug gelten eine Reihe systemischer Eigenheiten, die starken Einfluss auf die Systemauslegung haben. Dazu gehören Besonderheiten des Nutzerverhaltens ebenso wie Umweltbedingungen oder Randbedingungen der Sicherheit und Zuverlässigkeit. In Tabelle 25 sind eine Reihe von Produktmerkmalen des Antriebssystems aufgelistet:

Eigenstartfähigkeit	Um gewohntes Nutzerverhalten abbilden zu können, muss das Fahrzeug ohne externe Unterstützung starten können. Dies stellt Anforderungen an die Energiespeicher und das Aufheizverhalten.
Zyklischer Betrieb	Für die Anwendung im Fahrzeug gilt ein stark zyklisches Verhalten. Dabei werden viele dynamische Lastprofile durchfahren. Ein quasi-stationärer Betrieb stellt sich nur selten ein.
Variierende klimatische Bedingungen	Für Systeme, die im Fahrzeug verbaut werden, gelten hohe Anforderungen an die Verträglichkeit von Hitze, Kälte, hoher Luftfeuchtigkeit und die Toleranz von Verschmutzungen. Gerade für die Energiespeicher und die Brennstoffzelle stellt dies große Herausforderungen dar.
Rekuperationsfähigkeit	Ein vielfach gefordertes Merkmal elektrischer Antriebe. Die Rückspeisung erfordert bidirektionale Leistungselektronik und eine entsprechende Betriebsstrategie.
Leistungs- und Momentendichte	Aufgrund von Bauraumbeschränkungen im Fahrzeug muss die Leistungs- und Momentendichte möglichst hoch sein. Dies betrifft auch das Speichersystem für die Wasserstoffversorgung der Brennstoffzelle.

Integrationsfähigkeit	Für ein optimiertes Packaging im Fahrzeug sowie eine effiziente Strukturierung des Antriebssystems, wird die Integration verschiedener Systemkomponenten angestrebt. Dies betrifft beispielsweise Inverter und Antriebsmaschine oder Getriebe und Antriebsmaschine.
-----------------------	---

Tabelle 25: Typische Produktmerkmale elektrischer Antriebssysteme

Die Auflistung in Tabelle 25 soll keine vollständige Anforderungsbeschreibung sein. Sie verdeutlicht aber einige Randbedingungen der Anwendung, die für die System- und Komponentenauslegung relevant sind. Anforderungen und Grundlagen der wichtigsten Komponenten werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

12.3.2 Systembetrieb im Fahrzeug

Der Betrieb im Fahrzeug mit den in 12.3.1 definierten Anforderungen unterscheidet sich wesentlich vom Betrieb stationärer Brennstoffzellenanlagen. Insbesondere die dynamischen Eigenschaften und Degradationsphänomene der Brennstoffzelle müssen in der Betriebsführung und im Entwurf der Systemarchitektur berücksichtigt werden. Nach [190] und [195] treten im Fahrzeugbetrieb eine Reihe von Betriebsmodi auf, die das Brennstoffzellensystem belasten. Alle dieser Betriebsmodi bewirken innerhalb der Brennstoffzelle schädliche Nebenreaktionen, die langfristig eine Degradation der Zellspannung bewirken können. Hierbei sind hervorzuheben:

- **Start-Stopp-Betrieb (Brennstoffzellenstapel hoch fahren/herunter fahren)**
Während des Startvorgangs bildet sich innerhalb der Anode eine Wasserstofffront aus. Das Elektrodenpotential ist dabei für kurze Zeit nicht gleichmäßig. Dadurch kommt es zur sogenannten Kohlenstoffkorrosion [190],[191]. Im System wird daher zunächst der Wasserstoff eingespeist. Dabei wird ein Laststrom eingestellt, um die Spannung zu regeln. Danach erst wird der Brennstoffzellenstapel mit Luft beaufschlagt [190].
- **Lastzyklisierung (Beschleunigung/Abbremsung)**
Bei der im Automobilbereich typischen zyklischen Belastung können die Katalysatorpartikel beschädigt werden. Im System muss daher die Spannungsobergrenze genau kontrolliert werden [190].
- **Hochlastbetrieb (Konstante Fahrt bei hoher Geschwindigkeit)**
- **Niedriglastbetrieb (Leerlauf)**
Im Niedriglastbetrieb treten hohe Zellspannungen ohne Laststrom auf. Dadurch kann die Elektrolymembran beschädigt werden [190]. In diesem Fall muss unter Umständen also ebenfalls ein geringer Laststrom eingestellt werden.
- **Einsatz unter Einwirkung von Umgebungsverschmutzungen**
Durch den weltweiten Einsatz eines Systems im Fahrzeugbetrieb muss ein weites Spektrum möglicher Verunreinigungen berücksichtigt werden. Insbesondere die Verunreinigung mit SO_2 kann zur Schwefelvergiftung der Brennstoffzelle führen. Dies ist eine schwere Beschädigung und nicht reversibel [136].
- **Schnelle Kaltstarts sowie Kalt- und Heißlandbetrieb**
Durch Kälte kann die Feuchtigkeit innerhalb der Brennstoffzelle gefrieren, wodurch diese mechanisch geschädigt werden kann. Bei geringen Sättigungsdampfdrücken kann die Kathodenluft außerdem weniger Wasser aufnehmen. Das entstehende Produktwasser kann also nicht in ausreichender Form abgeführt werden, wodurch die Zelle überfluten kann [195]. Da die Zellspannung bei Kälte niedrig ist, muss ein externer Laststrom eingestellt werden, der die Zelle kontinuierlich durch Eigenwärmerwärmung aufheizt. Außerdem können elektrische Zuheizter und hohe Luftüberschüsse verwendet werden [195].

Nach [196] ist im Automobilbereich eine Lebensdauer des Systems von 5000 h im zyklischen Betrieb vorgesehen. Innerhalb dieser Zeit darf die Zellspannung nicht mehr als zehn Prozent abnehmen. Kaltstarts ab -20 °C müssen in 30 s abgeschlossen sein.

Alle in diesem Abschnitt beschriebenen Besonderheiten der Brennstoffzelle werden in der Entwurfsmethodik berücksichtigt. Der Entwurf muss sich zwingend an konkreten Nutzungsfällen orientieren. Funktionalitäten zur Betriebsführung und zur Vermeidung von Schädigungen müssen definiert werden. Außerdem muss die gesamte Systemauslegung so robust sein, dass sich Schwankungen der Lastbedingungen und Degradation im Laufe des Fahrzeuglebens nicht negativ auswirken.

13 Anhang C

13.1 Antriebsstrangkomponenten elektrischer Antriebssysteme

Die wichtigsten systemischen Anforderungen an elektrische Antriebsstränge wurden beschrieben. Es folgt ein Überblick über den Stand der Technik der wichtigsten Komponenten. Dabei wird nach der Beschreibung der physikalischen Grundlagen eine Übersicht über die Auslegung der Komponenten gegeben. Dadurch wird die Grundlage für spätere Vorauslegungsschritte geschaffen und gleichzeitig der Anwendungskontext für die Spezifikation- und Auslegungsmethodik definiert.

13.1.1 Energiespeicher: Grundlagen und Anforderungen

Der Energiespeicher ist in hybridisierten Antriebssystemen die Schlüsselkomponente um eine Reihe von Zusatzfunktionalitäten zu ermöglichen. Diese sind nach [197]:

- Regeneratives Bremsen
- Boost-Unterstützung
- Reiner Fahrbetrieb aus dem Energiespeicher
- Start/Stop-Unterstützung
- Betriebspunktverschiebung der Hauptenergiequelle in effizienteren Betriebspunkt

Zur elektrischen Energiespeicherung in elektrifizierten Fahrzeugen werden grundsätzlich Akkumulatoren oder Hochleistungskondensatoren (Supercaps) verwendet. Hochleistungskondensatoren bieten einige Vorteile, wie hohe Effizienz, schnelle Dynamik und hohe Leistungsdichten [198]. Aufgrund ihrer niedrigen Energiedichte werden aber fast ausschließlich Batteriesysteme in Brennstoffzellenanwendungen verwendet. Aus der Verwendung ergibt sich eine Reihe wichtiger Anforderungen an die Batteriesysteme [197]:

- Zur Boost-Unterstützung sind hohe spezifische Leistungsdichten notwendig
- Eine hohe gewünschte Reichweite bei Betrieb aus der Batterie erfordert hohe spezifische Energiedichten
- Leistungsanforderungen müssen in einem weiten Umgebungstemperaturbereich erreichbar sein
- Batterien in Hybridanwendungen müssen eine hohe Zahl von Lade- und Entladehuben verkraften
- Die Nennkapazität darf im Laufe des Fahrzeuglebens nicht signifikant absinken
- Es gelten hohe Sicherheitsanforderung für den Crashfall und den Betrieb des Batteriesystems

Den Vergleich verschiedener Batterietechnologien liefert ein Ragone-Diagramm, in dem die Energiedichte und die Leistungsdichte dargestellt werden:

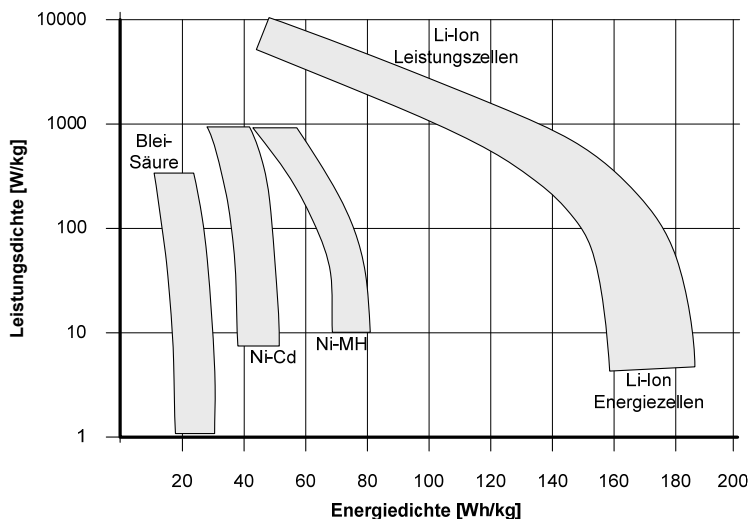


Abbildung 173: Vergleich verschiedener Energiespeicher im Ragone-Diagramm [197]

Zur Hybridisierung elektrischer Antriebsstränge mit Brennstoffzellen bietet sich genau wie bei der Hybridisierung konventioneller Antriebsstränge demnach eine Verwendung von Ni-MH oder Li-Ionen-Akkumulatoren an. Nur so können die beschriebenen Anforderungen an Leistungs- und Energiedichte erfüllt werden. Da Li-Ionen-Batterien mittlerweile den Stand der Technik darstellen, werden in dieser Arbeit nur Li-Ionen-Batterien betrachtet.

Alle Batterien bestehen grundsätzlich aus zwei Elektroden, einem Separator und einem Elektrolyten. Bei der Li-Ionen-Batterie besteht die negative Elektrode (Anode) aus einem Kohlenstoff-Trägermaterial, in dem Lithium-Ionen reversibel eingelagert werden können. Für die positive Elektrode (Kathode) kommt eine Reihe unterschiedlicher Materialien zum Einsatz. Die größte Verwendung hat LiCoO_2 [199]. Abbildung 174 zeigt eine Prinzipdarstellung einer einzelnen Batteriezelle:

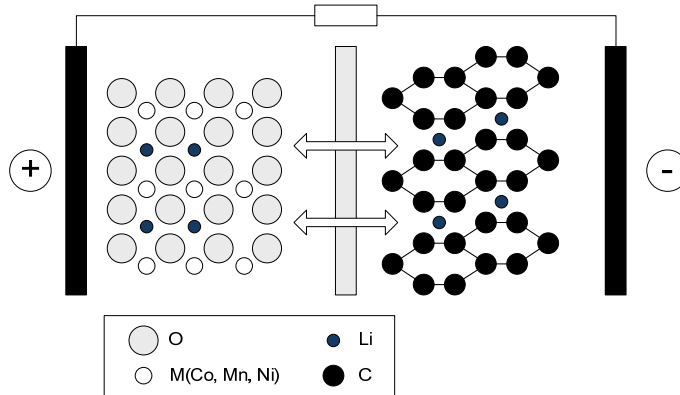
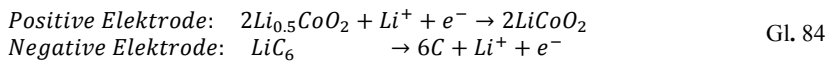


Abbildung 174: Prinzipdarstellung eines Lithium-Ionen-Akkumulators [200]

Im rechten Teil der Abbildung 174 sind die Lithium-Ionen dargestellt, die in die Graphitstrukturen eingelagert werden (Interkalation). Auf der linken Seite ist ein Metalloxid dargestellt, welches ebenfalls Lithium-Ionen einlagert. Beim Entladeprozess wandern diese durch den organischen Elektrolyten zur negativen Elektrode. Das dabei freiwerdende Elektron wird über einen äußeren Stromkreis geführt. Für die Elektrodenreaktionen gilt nach [201]:



Durch die beschriebenen Materialkombination können sehr dünne Elektroden ($< 0,5 \text{ mm}$) und hohe Zellspannungen von ca. $3,6 \text{ V}$ erreicht werden [109].

Für den Einsatz im Antriebssystem werden die einzelnen Zellen zu Batteriepacks zusammengefasst. Dabei werden üblicherweise Module aus Einzelzellen gebildet. Diese Module werden dann zum gesamten Batteriepack zusammengesetzt [202], [203]. Abbildung 175 zeigt den schematischen Aufbau aus Zellen und Modulen:

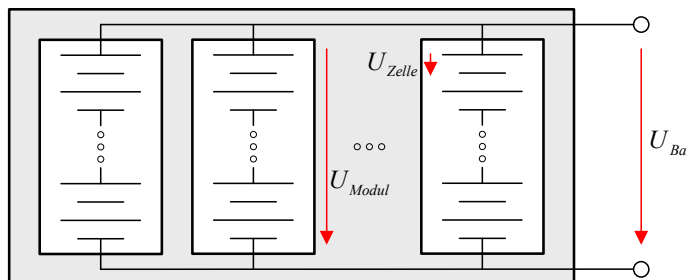


Abbildung 175: Aufbau eines Batteriepacks aus Modulen und Einzelzellen

Eine Reihenschaltung der Zellen erhöht die Spannung, eine Parallelschaltung erhöht die Kapazität. Auf diesem Weg kann ein Batteriepack mit den gewünschten Kenndaten zusammengesetzt werden.

Für die Auslegung sind, neben dem elektrischen Aufbau, die Sicherheit und die Betriebsstrategie des Akkupacks entscheidend. Die hohe chemische Aktivität des Lithiums erfordert eine Reihe von Maßnahmen, die im Betrieb eingehalten werden müssen. Die Trennschichten, die sich innerhalb der Zelle zwischen Graphitstruktur und Elektrolyt aufbauen, müssen stabil gehalten werden. Dazu muss die Temperatur der Zellen unterhalb von ca. 45 – 50 °C bleiben [197]. Diese Anforderung ist zum Betrieb im Antriebssystem hochrelevant. Neben den Temperaturrandbedingungen besteht bei allen Batteriezellen eine Abhängigkeit zwischen Alterung der Zellen und der Betriebsstrategie. Für hybridisierte Antriebssysteme, in denen der elektrische Energiespeicher eine Pufferfunktion erfüllt, gelten die folgenden Effekte:

- Hohe Zyklenzahl bei gleichzeitig kleinen Zyklenhuben: Durch zyklisches Laden und Entladen wird die Batterie geschädigt. Diese Schädigung ist stärker, wenn die Zyklenhuben groß sind [109]
- Notwendige Erhaltung der Startfähigkeit und Vermeidung von schädlicher Tiefentladung durch ausreichend hohen Mindestladezustand [109]
- Vermeidung von Kapazitätsverlust und Leistungsverlust durch Trennschichtwachstum. Dazu muss eine Überladung der Zellen verhindert werden [197]

Ein vollständiges Batteriesystem benötigt aufgrund dieser Randbedingungen ein Batteriemanagement und eine Reihe von Peripheriekomponenten, die in Abbildung 176 dargestellt sind:

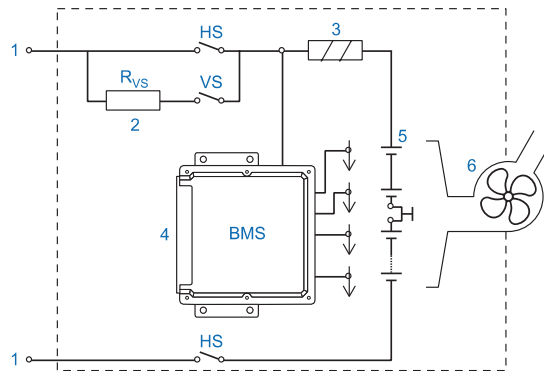


Abbildung 176: Vollständiges Batteriesystem (1: Batterieklemmen; 2: Vorladewiderstand; 3: Sicherung; 4: Batteriemanagementsystem; 5: Batteriepack; 6: Kühlgebläse; HS: Hauptschutz; VS: Vorladeschutz) [204]

Neben dem Batteriepack, dem Steuergerät mit dem Batteriemanagement und der Kühlung sind weitere Komponenten dargestellt, die den elektrischen Betrieb absichern. Diese werden hier nicht detailliert betrachtet. Genauere Beschreibungen können [204] entnommen werden.

Für die Auslegung des Batteriemanagements ist das dynamische Verhalten des Batteriepacks entscheidend. Das elektrochemische Verhalten der Batterien bewirkt eine Spannungskennlinie, die mit zunehmender Last und Entladetiefe absinkt. Abbildung 177 zeigt dieses Verhalten schematisch:

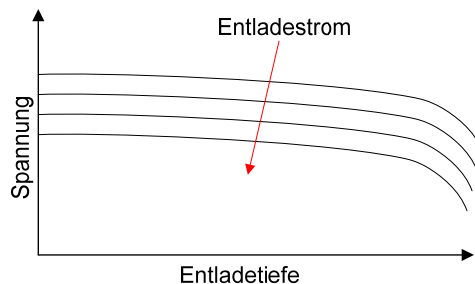


Abbildung 177: Batteriespannung bei Entladung mit verschiedenen Entladeströmen [205]

Zusätzlich ist die Temperaturabhängigkeit für den Einsatz in Antriebssystemen hochrelevant. Daraus ergibt sich ein funktionaler Bedarf für eine Vorgabe flexibler Leistungsgrenzen und eine Messung der

Umgebungsbedingungen. Abbildung 178 zeigt ein Beispiel für die Leistungsgrenzen der Li-Ionen-Batterie eines konventionellen Hybridantriebsstrangs:

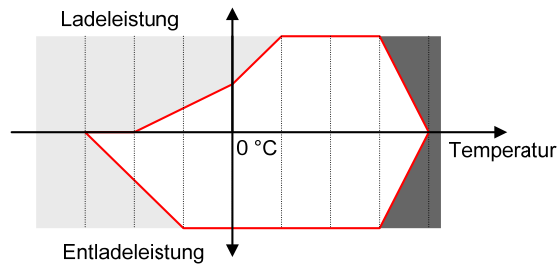


Abbildung 178: Temperaturabhängige Leistungsgrenzen einer Li-Ionen-Hybridbatterie [181]

Das Batteriemanagement muss aufgrund dieser Randbedingungen geeignete Lade- und Entladestromgrenzen oder Leistungsgrenzen vorgeben. Die Lade- und Betriebsstrategie muss darauf ausgerichtet sein, den Batterieladestand (SOC) in einem vorgegebenen Fenster zu halten [204]. Dabei können unterschiedliche Entladeregime zum Einsatz kommen, wie Abbildung 179 zeigt:

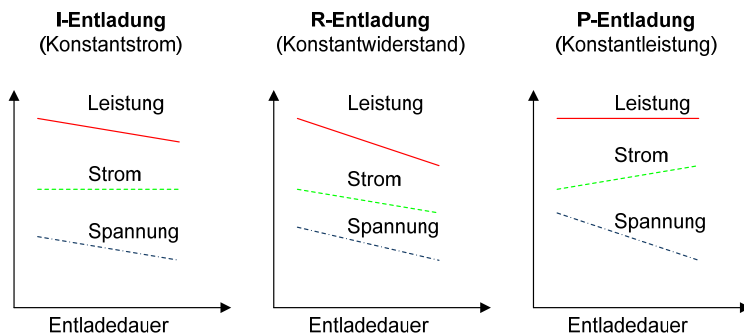


Abbildung 179: Entladeregime von Traktionsbatterien [205]

Für die Bestimmung der Leistungsgrenzen der Batteriezellen muss der Batteriezustand (Strom, Spannung, Temperatur) ermittelt werden. Das Batteriemanagement kommuniziert Leistungsgrenzen und Kühlungsanforderungen dann an übergeordnete Systeme.

Für den Entwurfsprozess elektrischer Antriebssysteme ergibt sich mit den vorgestellten Grundlagen eine Reihe von Funktionen, Komponenten und Kenngrößen, die spezifiziert werden müssen. Die hohe systemische Abhängigkeit von der Primärenergiequelle im Fahrzeug und der Betriebsstrategie zeigen, dass diese Auslegung nur im Systemverbund erfolgen kann und Elemente der physikalischen Auslegung, der Funktionsdefinition und des Steuerungsentwurfs berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus ist eine Betrachtung der genauen Anwendungsfälle zur Spezifikation der Umweltrandbedingungen unerlässlich.

13.1.2 Elektrische Maschinen – Grundlagen und Anforderungen

Für die Verwendung als Traktionsmaschinen in elektrischen Fahrzeugen sind unterschiedliche Maschinentypen geeignet. Dabei handelt es sich bei allen bekannten Anwendungen um dreiphasige Drehstrommaschinen. Die Auswahl der Maschine lässt sich nur auf der Systemebene treffen. Alle Drehstrommaschinen bestehen grundsätzlich aus einem Stator, der als Blechpaket ausgeführt ist, und aus einem Rotor. Im Stator wird elektrische Leistung zu- oder abgeführt. Im Rotor wird mechanische Leistung zu- oder abgeführt [206]. Der Rotor kann entweder elektrisch magnetisiert (elektrische Erregung) oder mit Permanentmagneten (Permanenterregung) bestückt werden. Für elektrische Traktionsantriebe ist nach derzeitigem Stand der Technik die permanenterregte Synchronmaschine (PMSM) dominant [48]. In Abbildung 180 ist die Einordnung der PMSM in die Klassifikation der Drehstrommaschinen dargestellt. Weitere Maschinentypen, die für diese Arbeit nicht von Bedeutung sind, werden nicht weiter betrachtet. Eine umfassende Übersicht ist in [207] enthalten.

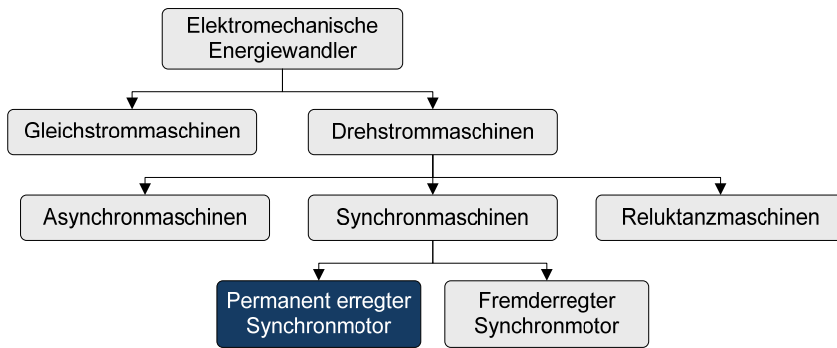


Abbildung 180: Klassifikation elektromechanischer Energiewandler [206]

Bei allen Drehstrommaschinen werden im Stator drei Spulen räumlich im Kreis angeordnet. Der Winkel zwischen diesen Phasen beträgt 120° . Die Spulen werden auf Zähnen aus Elektroblech angeordnet, da dieses Material über eine hohe magnetische Flussdichte verfügt und sich daher starke Felder erzeugen lassen. Abbildung 181 zeigt den Querschnitt durch eine schematische Darstellung einer PMSM.

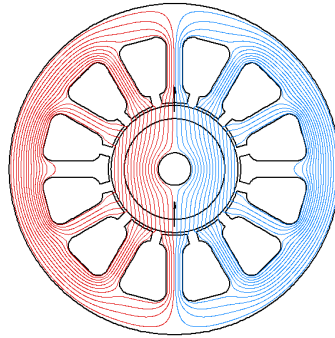


Abbildung 181: Schematische Darstellung des Blechschnitts einer PMSM [208]

Auf den Zähnen des Blechpakets laufen die Spulen. Eine Spule kann dabei, wie in Abbildung 181 auf eine höhere Lochzahl verteilt werden, was elektromechanische Vorteile hat, auf die hier nicht näher eingegangen wird [208]. Wird nun jede der Phasen zeitversetzt mit Wechselstrom beaufschlagt (durch die phasenverschobenen Ströme eines Drehstromsystems), wandern die magnetischen Pole von Spule zu Spule. Es entsteht ein mit der Frequenz des Erregerdrehstroms umlaufendes Magnetfeld, das sogenannte Erreger- oder Statorfeld [209]. Die Drehzahl berechnet sich nach Gl. 85 zu:

$$n_1 = \frac{f_1}{p} \quad \text{Gl. 85}$$

Mit: n_1 : Synchrone Drehzahl p : Polpaarzahl f_1 : Frequenz des Erregerdrehstroms

Der Rotor ist bei einer permanenterregten Maschine mit Permanentmagneten bestückt. Diese Magnete erzeugen das magnetische Rotorfeld, dessen Feldlinien sich über den Stator schließen [208]. In Abbildung 181 sind die Feldlinien des geschlossenen Feldes dargestellt. Der Rotor einer Synchronmaschine folgt dem drehenden Erregerfeld synchron. Die Maschine dreht also mit der gleichen Drehzahl, wie das Erregerfeld. Das entstehende Drehmoment berechnet sich nach [209] gemäß Gl. 86:

$$M = I \cdot B_f \cdot l \cdot r \quad \text{Gl. 86}$$

Mit: M : Drehmoment l : Länge der Maschine I : Strom im Rotor
 r : Rotordurchmesser B_f : Ständerfeld

Aus Gl. 86 ist ersichtlich, dass die Drehmomentdichte der Maschine hauptsächlich durch zwei Größen beeinflusst werden kann: Einerseits durch die Materialeigenschaften des Stators, welche die Flussdichte bestimmen, andererseits durch den Erregerstrom und damit durch die Stromtragfähigkeit der Wicklungen, welche u.a. von der Kühlung der Maschine abhängt. Nach [207] bestehen grundsätzliche Zielkonflikte in der Auslegung zwischen Leistungsdichte und Materialkosten, sowie zwischen Drehmomentdichte und Eigensicherheit [207]. Für die Einbindung der Maschine in den Antriebsstrang ist der Maschinendurchmesser über den verfügbaren Bauraum begrenzt. Nach [48] wird die Maschinenlänge neben den Drehmomentanforderungen durch den verfügbaren Ausgangsstrom des Inverters und die gewünschte Dauerleistung festgelegt. Die mechanische Abgabeleistung berechnet sich nach [209] zu:

$$P = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad \text{Gl. 87}$$

Mit: M : Drehmoment n_1 : Synchroner Drehzahl ω : Kreisgeschwindigkeit

Die elektrische Leistung reduziert sich um Ständer- und Läuferwiderstände, sowie Eisenverluste [209]. Die resultierenden Kennlinien von Drehmoment und Leistungsabgabe zeigt Abbildung 182

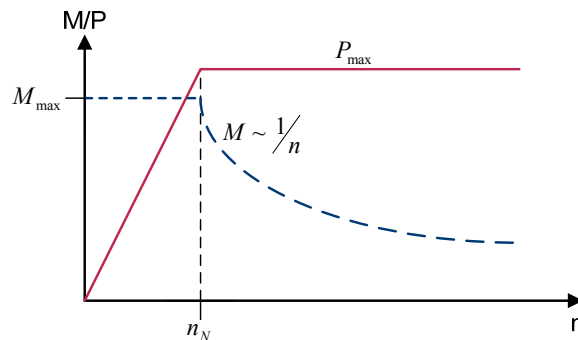


Abbildung 182: Drehmoment und Leistungskennlinie der Synchronmaschine

Elektrische Maschinen zeichnen sich durch das hohe Momentenangebot im niedrigen Drehzahlbereich aus. Für die Systemauslegung sind mehrere Betriebsgrößen und Randbedingungen relevant.

- **Maximalmoment und Überlastbereich:** Durch kurzzeitige Überlastung der Maschine kann man ein deutlich überhöhtes Drehmoment erzeugen. In diesem Überlastbereich darf sich die Maschine aus thermischen Gründen aber nur kurzzeitig bewegen. Kühlsystem und Inverterausgangsstrom müssen die hohe Last zumindest kurzfristig ertragen. Trotzdem kann der Überlastbereich genutzt werden, um in Anfahrtsituationen auf ein Mehrganggetriebe verzichten zu können.
- **Die Eckdrehzahl n_N :** Die Eckdrehzahl markiert den Punkt an dem die Drehmomentkennlinie abknickt und in den sogenannten Feldschwächebereich geht. In diesem Bereich wird der magnetische Fluss durch eine spezielle Stromsteuerung verringert. Dadurch kann die Drehzahl der Maschine weiter gesteigert werden, ohne den zulässigen Wicklungsstrom zu überschreiten [210]. Die Leistung bleibt dadurch konstant, wie in Abbildung 182 dargestellt, das Drehmoment fällt umgekehrt proportional zur Drehzahl ab. Für die Fahrzeugauslegung wird die Eckdrehzahl normalerweise auf den städtischen Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 – 60 km/h gelegt.
- **Die Eigensicherheit der Maschine** ist bei der Verwendung als Traktionsmaschine sehr wichtig. Im Fehlerfall können durch die Drehung des permanenterregten Rotors hohe Ströme induziert werden. Diese können den thermischen Nennstrom übersteigen oder Bremsmomente auslösen, die für das Fahrzeug potentiell gefährlich sind. Daher muss das Antriebssystem auf solche Fehlerfälle vorbereitet sein [207]
- Der typische Betrieb im Fahrzeug stellt hohe Anforderungen an den drehzahlvariablen Betrieb und an den Mehrquadrantenbetrieb der Maschine. Dadurch wird im hybridisierten Antriebsstrang eine Rückspeisung elektrischer Energie bei einem Bremsvorgang ermöglicht. Der Antriebsinverter muss den Mehrquadrantenbetrieb entsprechend unterstützen. In Abbildung 183 sind die Betriebsgrenzen einer Synchronmaschine mit Überlastbereich für vier Quadranten dargestellt. Negatives Drehmoment steht dabei für generatorischen Betrieb, negative Drehzahlen für Rückwärtsfahrt.

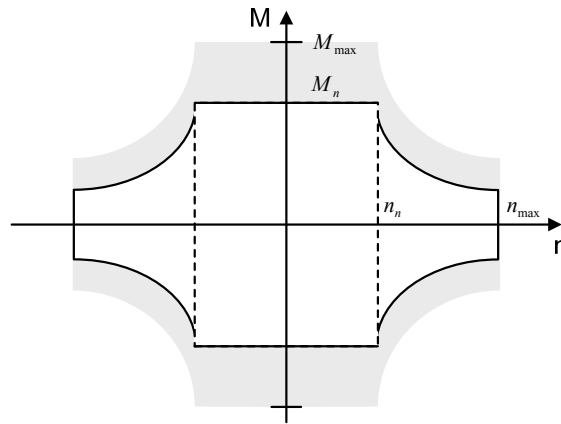


Abbildung 183: Betriebsgrenzen einer elektrischen Maschine [206]

Neben den Betriebsgrenzen der Moment- und Leistungskennlinien gelten dynamische Eigenschaften des Traktionsantriebs. Nach dem Drallsatz gilt:

$$J \cdot \dot{\omega}_N = M_a - M_w \quad \text{Gl. 88}$$

Daraus ergibt sich für die Hochlaufzeit auf Nenndrehzahl der Zusammenhang aus [211]:

$$t_H = \frac{J \cdot \omega_N}{M_a - M_w} \quad \text{Gl. 89}$$

Mit: M_a : Antriebsmoment M_w : Widerstandsmoment
 ω : Kreisgeschwindigkeit J : Massenträgheitsmoment

Durch entsprechende mechanische Auslegung des Rotors können die dynamischen Eigenschaften angepasst werden. Sind weitere Abdeckungen des Drehmoment-Drehzahl-Kennfelds notwendig, werden elektrische Maschinen mit Getriebestufen kombiniert. Diese werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

13.1.3 Getriebe in elektrischen Traktionssystemen

Aufgrund des günstigen Drehmomentkennfelds ist es bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen nicht zwingend notwendig ein Getriebe zu verwenden. Die meisten Fahrzeuge verwenden eine einfache einstufige Übersetzung. Diese lässt sich mit hohem Wirkungsgrad realisieren und ist oftmals in der Differenzialstufe integriert. Mit einem Getriebe kann man prinzipiell die folgenden Vorteile nutzen:

- Erhöhter Wirkungsgrad: Durch den Einsatz eines mehrstufigen oder variablen Getriebes kann der Motor dauerhaft in günstigen Wirkungsgradbereichen betrieben werden. Nach [212] können dadurch Verbrauchseinsparungen zwischen 5 und 12 Prozent erreicht werden. Dabei besteht eine starke Abhängigkeit zum betrachteten Fahrzyklus. Außerdem müssen Nachteile wie Gewichtszunahme, Kosten und Komplexität berücksichtigt werden.
- Erhöhtes Radmoment für hohe Drehmomentanforderungen oder erhöhte Maximaldrehzahl zur Abdeckung hoher Geschwindigkeitsbereiche.

Gerade für elektrische Antriebsmaschinen muss in der Auslegung berücksichtigt werden, ob sich kurzzeitige Drehmomentanforderungen durch Nutzung des Überlastbereichs abdecken lassen. Ist dies nicht der Fall, kann das Getriebe entsprechend ausgelegt werden. Dadurch sinken dann jedoch die Maximaldrehzahl und damit die erreichbare Fahrzeuggeschwindigkeit. Mit einer Beispielrechnung lässt sich darstellen, wie die Maschinenkennlinie durch ein Getriebe abgesenkt werden kann. Das Bedarfsradmoment ergibt sich aus den Fahrwiderständen nach Gl. 90:

$$M_R = (F_W + F_R + F_a) \cdot r_{dyn} \quad \text{Gl. 90}$$

Mit: F_W : Luftwiderstandskraft F_a : Beschleunigungswiderstandskraft
 F_R : Rollwiderstandskraft r_{dyn} : Dynamischer Radradius

Das Bedarfsmoment an der Traktionsmaschine ergibt sich daraus zu:

$$M_{EM} = M_R \cdot i_{ges} \quad \text{Gl. 91}$$

Mit: M_R : Bedarfsradmoment i_{ges} : Gesamtübersetzung

Abbildung 184 zeigt eine beispielhafte Auslegung für die Bedarfskennlinie einer elektrischen Traktionsmaschine. Dabei wurde eine hypothetische Kennlinie an mehreren Bedarfspunkten ausgerichtet. Folgende Annahmen liegen Abbildung 184 zugrunde:

- Anfahrvorgang bei 40 % Steigung → Ergibt Maximalmoment
- Stationäre Bergfahrt mit 7 % Steigung
- Höchstgeschwindigkeit 160 km/h → Ergibt Maximaldrehzahl
- Fiktive konstante Gesamtübersetzung $i_{ges} = 3$

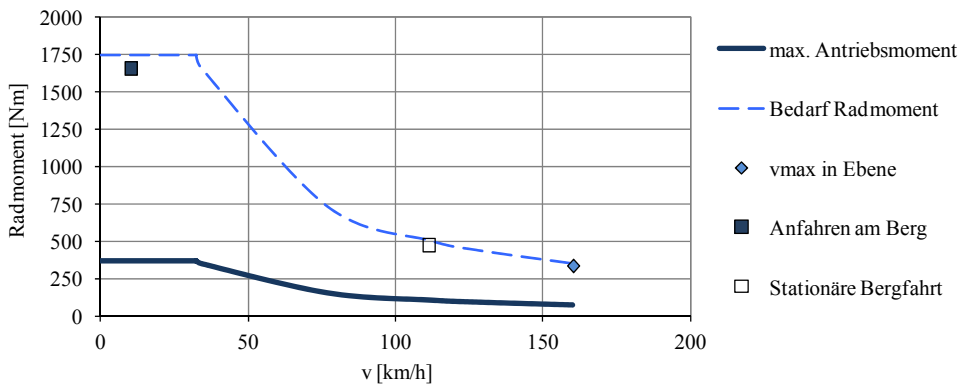


Abbildung 184: Bedarfsradmoment und Antriebsmoment für fiktive Kennlinie

Das deutlich abgesenkte Antriebsmoment verdeutlicht die Wirkung der Getriebeübersetzung. Für den Leistungsverlauf, der in Abbildung 185 dargestellt ist, ergibt sich lediglich eine Abweichung um den Getriebewirkungsgrad. Dieser wird für eine einstufige Übersetzung in diesem Beispiel mit 0,95 angenommen.

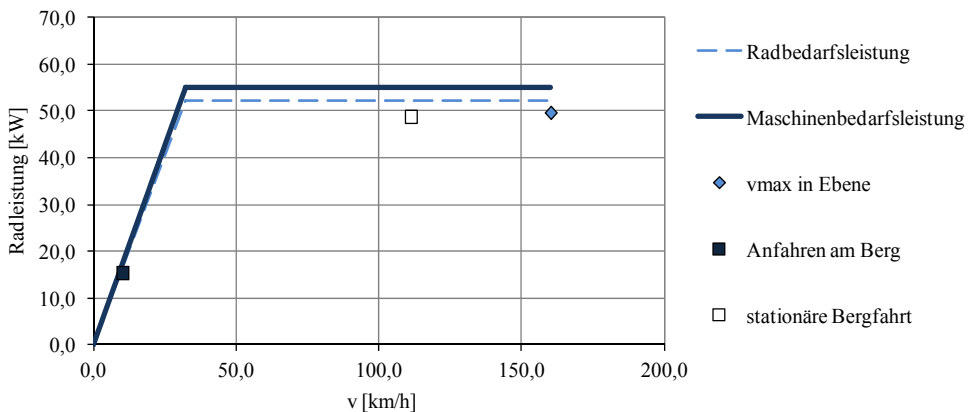


Abbildung 185: Gegenüberstellung von Bedarfsleistung und Antriebsleistung

Auch der Auswahl der Getriebeübersetzung lässt sich nach den beschriebenen Zusammenhängen nur auf Gesamtfahrzeugebene bewerten. Dabei muss die Maschinenauslegung ebenso berücksichtigt werden, wie die Maschinenansteuerung, sowie die Komplexitäts- und Gewichtszunahme des Antriebsstrangs.

13.1.4 Grundlagen der Leistungselektronik

Die Leistungselektronik ist im elektrischen Antriebsstrang von zentraler Bedeutung. Die Stelleinrichtungen, die Leistungs- und Stromflüsse zwischen den Energiespeichern und der Traktionsmaschine regeln, sind grundsätzlich aus gesteuerten Halbleiterschaltern aufgebaut. Je nach Spannungsniveau und Schaltfrequenz kommen dabei Mosfets (metal oxide semiconductor field-effect transistor) oder IGBTs (insulated-gate bipolar transistor) zum Einsatz [194]. Die Stelleinrichtungen, die in den hier betrachteten Antriebssystemen verwendet werden, sind Gleichspannungswandler und Wechselrichter. Die Prinzipien der grundlegenden Wandlerschaltungen werden hier kurz beschrieben.

- Gleichspannungswandler (DC/DC-Konverter): Gleichspannungswandler werden verwendet um die Gleichspannung einer Quelle in eine Ausgangsspannung mit einer bestimmten Spannungs-Strom-Charakteristik umzuwandeln [49]. Die Ausgangsspannung kann dabei ein höheres oder niedrigeres Niveau annehmen.
- Wechselrichter wandeln die Gleichspannung einer Quelle oder eines Zwischenkreises in die für den Betrieb einer Drehstrommaschine benötigte dreiphasige, phasenverschobene Wechselspannung.

Zwei grundlegende Prinzipien gelten für alle Wandlerschaltungen:

- Die Schaltsignale für die Halbleiterschalter werden durch Pulsweitenmodulation (PWM) erzeugt. Dabei wird ein Aussteuergrad mit einem Trägersignal, üblicherweise ein Dreieckssignal verglichen. Dadurch entsteht ein periodisches Pulsmuster, das zur Ansteuerung der Halbleiterschalter verwendet werden kann.
- Ein schaltender Spannungswandler erzeugt durch periodische Ansteuerung der Schaltelemente eine pulsierende Spannung. Der zeitliche Mittelwert ist eine Gleichspannung, die bei konstanter Aussteuerung dem Aussteuergrad entspricht [213].

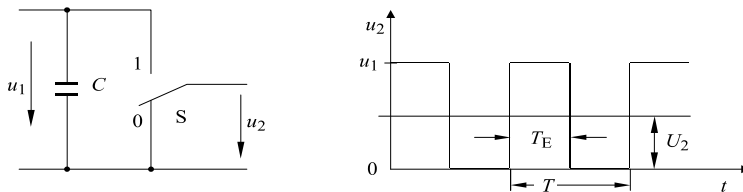


Abbildung 186: Prinzip eines schaltenden Spannungswandlers am Beispiel Tiefsetzsteller [213]

Es gibt unterschiedliche Typen von Gleichspannungswandlern. Hochsetzsteller erzeugen eine höhere, Tiefsetzsteller eine niedrigere Ausgangsspannung als die zugeführte Eingangsspannung. Sogenannte Hoch-Tiefsetzsteller können das Ausgangsspannungsniveau erhöhen oder verringern. Die Auswahl des Wandlertyps muss auf Systemebene durch eine Betrachtung der geforderten Spannungsniveaus sowie deren Schwankungsbreiten erfolgen. Ist ein Leistungsfluss in beide Richtungen des Wandlers notwendig, wie beispielsweise bei der Rekuperation von Bremsenergie, muss ein sogenannter bidirektionaler Wandler eingesetzt werden. Abbildung 187 zeigt das Ersatzschaltbild eines Tiefsetzstellers sowie die Ersatzschaltbilder für die beiden Arbeitstakte „Aufladen“ und „Entladen“:

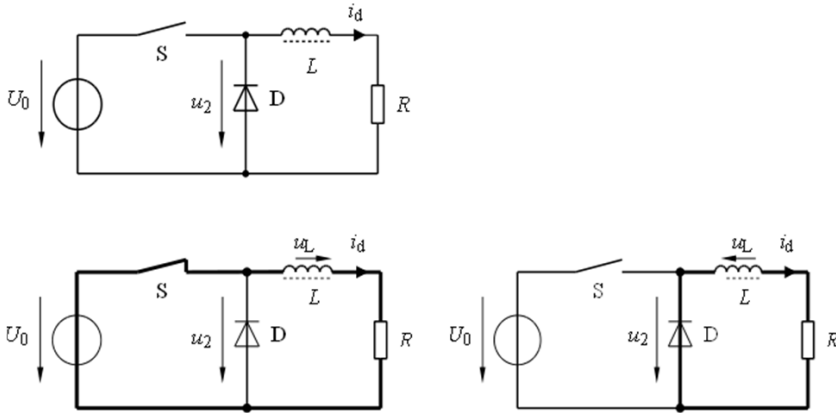


Abbildung 187: Tiefsetzsteller [213]

In Abbildung 187 sind eine Freilaufdiode und eine Induktivität, die als Speicherdrossel wirkt, dargestellt. Durch die zyklischen Schaltvorgänge wird die Induktivität aufgeladen und entladen. Die Freilaufdiode verhindert einen zu starken Anstieg der Spannung bei plötzlichem Öffnen des Schalters [94].

- Bei geschlossenem Schalter wird die Induktivität aufgeladen. Es resultiert ein exponentieller Stromanstieg nach Gl. 92, [213]. Die Freilaufdiode sperrt in diesem Zustand.

$$i_d = I_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad \text{Gl. 92}$$

Mit: $\tau = \frac{L}{R}$ (Zeitkonstante) und $I_0 = \frac{U_0}{R}$ (Strom zum Zeitpunkt 0)

- Wird der Schalter wieder geöffnet fließt der Strom über die Freilaufdiode weiter. Es entsteht ein exponentieller Stromabfall nach Gl. 93, [213].

$$i_d = I_1 \cdot e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \quad \text{Gl. 93}$$

Mit: $I_1 = i_d(t_1)$ Strom zum Zeitpunkt 1

Für Strom und Spannung ergeben sich dadurch die in Abbildung 188 dargestellten Verhältnisse:

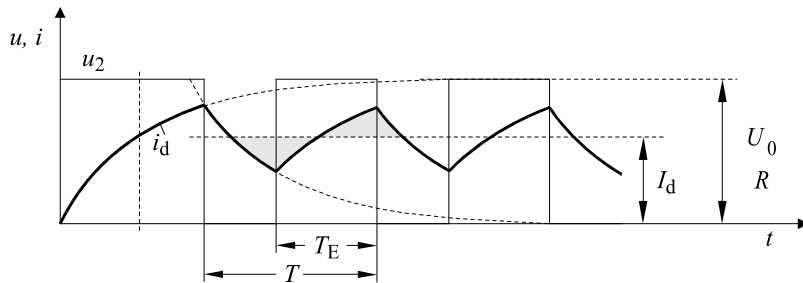


Abbildung 188: Strom und Spannungsverlauf eines Tiefsetzstellers [213]

Aus der Betrachtung der zwei Ersatzschaltbilder in Abbildung 187 ergibt sich der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsspannung nach [94]:

$$(U_{\text{ein}} - U_{\text{aus}}) \cdot T_E - U_{\text{aus}} \cdot (T - T_E) \quad \text{Gl. 94}$$

Nach [213] ist die Aussteuerung (Duty Cycle):

$$D = \frac{T_E}{T} \quad \text{Gl. 95}$$

Damit folgt aus Gl. 94 der Zusammenhang für die Ausgangsspannung des Tiefsetzstellers in Abhängigkeit der PWM-Ansteuerung:

$$U_{aus} = D \cdot U_{ein} \quad \text{Gl. 96}$$

Ein Hochsetzsteller funktioniert prinzipiell ähnlich. Er hat jedoch die Aufgabe die Eingangsspannung auf ein höheres Niveau zu heben. Abbildung 189 Zeigt das Ersatzschaltbild eines Hochsetzstellers, sowie die Ersatzschaltbilder für die beiden Arbeitstakte „Aufladen“ und „Entladen“:

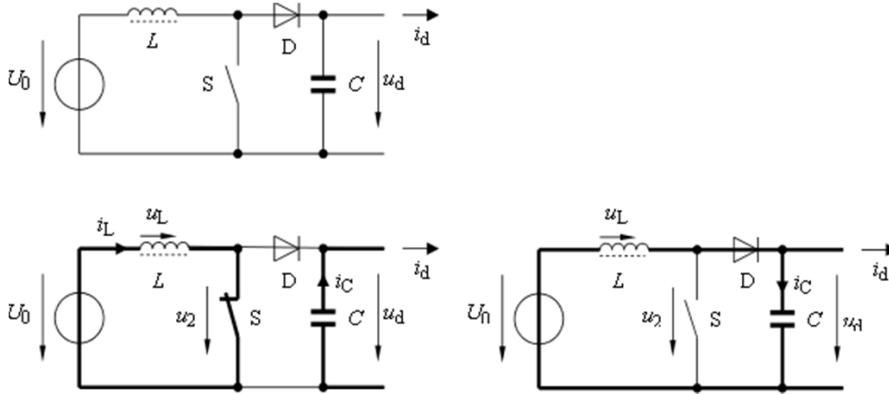


Abbildung 189: Hochsetzsteller, [213]

Im Gegensatz zum Tiefsetzsteller wird beim Hochsetzsteller über das Aufladen der Induktivität eine zusätzliche Spannung bereitgestellt, die sich zur Eingangsspannung addiert. Ein Glättungskondensator bildet am Ausgang den Mittelwert der Spannung. Die Diode schützt den Kondensator gegen Entladung durch den Schalter [213].

- Bei geschlossenem Schalter sperrt die Diode. Die Induktivität wird aufgeladen, der Glättungskondensator wird entladen
- Bei geöffnetem Schalter addieren sich Eingangsspannung und die Spannung über der Induktivität. Der Glättungskondensator wird aufgeladen.

Analog zu den Betrachtungen für den Tiefsetzsteller ergibt sich ein Ausdruck für die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Aussteuerung [94]:

$$U_{aus} = \frac{1}{1-D} \cdot U_{ein} \quad \text{Gl. 97}$$

Betrachtet man die Wandler nun im Systemverbund ergeben sich zwei wichtige Anforderungen. Die Spannung des Zwischenkreises wird durch die in den Wandlern verwendeten Halbleiter direkt begrenzt. Die verwendeten Halbleiter gehören üblicherweise der 600 V-Klasse an. Wenn man mit Umschaltspitzen von ca. 150 V rechnet, wird die Zwischenkreisspannung auf ca. 450 V beschränkt. Für den Betrieb im Antriebssystem sind außerdem die Spannungsniveaus der angeschlossenen Quellen und des Zwischenkreises relevant. Aus der Schwankungsbreite der Spannungen ergeben sich sowohl das benötigte Übersetzungsverhältnis des Wandlers als auch die benötigten Betriebs-Quadranten. Schwankungen der Spannungslagen von Brennstoffzelle und Batterie lassen sich gemäß den zuvor beschriebenen Grundlagen nach Gl. 98 ausdrücken:

$$U_{BZ} = f(n_Z, T, \lambda), U_{Bat} = f(n_{ZB}, T, SOC) \quad \text{Gl. 98}$$

Mit: n_Z : Zellzahl n_{ZB} : Zellzahl Batterie T : Temperatur
 SOC : Ladestand der Batterie λ : Membranfeuchte

Für die Spannung der Brennstoffzelle besteht eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Temperatur und von der Membranfeuchte. Die Batteriespannung schwankt in Abhängigkeit der Temperatur und des Ladestands. Außer diesen äußeren Schwankungen wird die mittlere Spannung durch die Wahl der jeweiligen Zellzahlen festgelegt. Bei einer Topologie mit einem Wandler vor der Batterie können sich

dadurch Überlappungen der Spannungslagen auf der Eingangs- und der Ausgangsseite des Wandlers ergeben. Abbildung 190 verdeutlicht diesen Effekt durch eine Darstellung der beiden Spannungslagen.

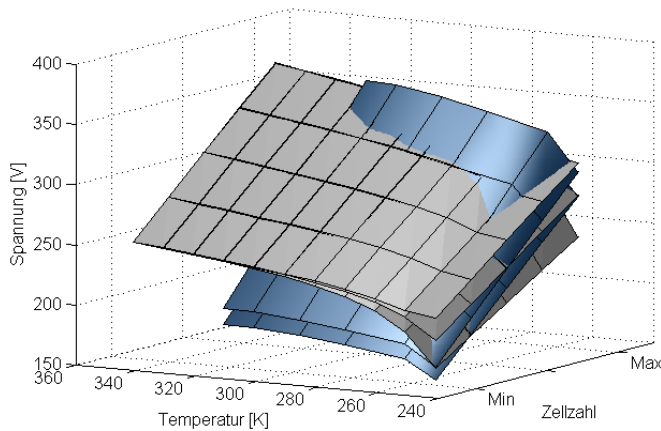


Abbildung 190: Spannungslagen von Batterie (dunkel) und Brennstoffzellenstapel (hell)

Die Abbildung zeigt das Kennfeld der Batterie für einen angenommenen Strom von 75 A und zwei verschiedenen Ladeständen. Die Temperaturabhängigkeit ergibt sich hauptsächlich durch den niedrigeren Innenwiderstand bei höheren Temperaturen. Das Kennfeld des Brennstoffzellenstapels wird in Abhängigkeit von der Temperatur und für drei verschiedene Membranfeuchten wiedergegeben. Die betrachtete Batterie hat 50 – 90 Zellen, der Brennstoffzellenstapel hat für 250 – 380 Zellen. Es zeigt sich, dass es sowohl in Abhängigkeit der Auslegung (Zellzahl) als auch in Abhängigkeit externer Faktoren zu einer Überschneidung der Spannungslagen kommen kann. Daher muss in einer solchen Topologie ein bidirektionaler Wandler verwendet werden.

Als Konsequenz für den Entwurfsprozess lässt sich festhalten, dass für die Festlegung der äußeren Randbedingungen für die Wandler eine genaue Beschreibung der physikalischen Einflüsse notwendig ist. Diese Beschreibung muss sowohl in Abhängigkeit der Topologie erfolgen als auch in Abhängigkeit der gewählten Einsatzbedingungen.

Eine weitere zentrale Komponente des elektrischen Antriebsstrangs ist der Wechselrichter. Dieser wird benötigt um aus der Gleichspannung des Hauptspannungsbuses einen dreiphasigen Wechselstrom für den Betrieb der Traktionsmaschine zu erzeugen. Abbildung 191 zeigt ein Ausführungsbeispiel mit drei Phasen und sechs Halbleiterschaltern:

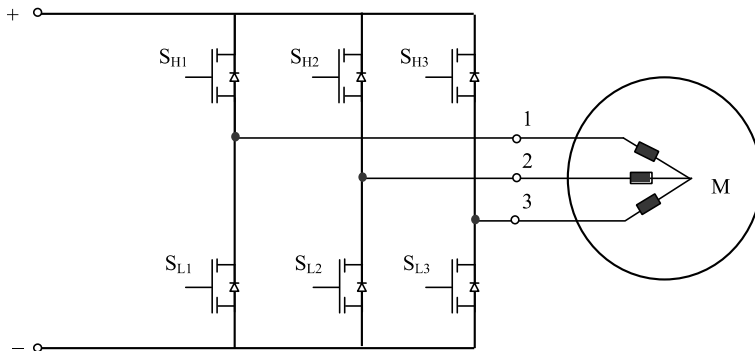


Abbildung 191: Dreiphasige Wechselrichterbrücke [209]

Zur Ansteuerung des Inverters wird ein Komparator mit einer sinusförmigen Steuerspannung angesteuert. Dadurch entsteht ein phasenverschobenes Pulsmuster. Wird dies für die drei Phasen mit 120 ° Phasenverschiebung durchgeführt, entsteht ein Drehstromsystem, das zum Treiben der Traktionsmaschine geeignet ist [209].

Für Entwurf und Spezifikation ist die gemeinsame Betrachtung mit der Traktionsmaschine und mit der Zwischenkreisspannung relevant. Zusätzlich ist eine funktionale Betrachtung aufgrund von Sicherheitsanforderungen in Kombination mit der Fahrzeugbewegung notwendig. Nach [194] sind wesentliche Herausforderungen die hohen Betriebstemperaturen, der Bauraumbedarf und der Aufwand der Verkabelung. Dadurch bieten sich beim Inverter Integrationspotentiale mit der Traktionsmaschine. Der Motorkühlkreislauf kann mit genutzt werden, Kabel- und Steckverbinder werden eingespart [214]. Sinnvolle Randbedingungen für den Entwurf sind daher die Betrachtung der Kühlung auf gleichem Temperaturniveau wie die Traktionsmaschine, sowie die integrierte Wirkungsgradbetrachtung von Inverter und Traktionsmaschine.

14 Anhang D

14.1 Clusterungsverfahren

Ein Verfahren zur Clusterung hat grundsätzlich das Ziel, Elemente einer Menge zu Untermengen zu gruppieren. Die Kriterien, nach denen diese Untermengen gebildet werden, sind grundsätzlich frei wählbar. Eine formale Definition findet sich z.B. in [215]. Demnach partitioniert ein Clusteralgorithmus eine Menge X von m Datenelementen x_i in k Gruppen C_k so, dass Elemente der gleichen Gruppe sich ähnlicher sind als Elemente unterschiedlicher Gruppen. Es wird also eine Abbildung $X \rightarrow C$ der Datenelemente in die Cluster C_k erzeugt. Jede der k Gruppen wird Cluster genannt. Grundlage jedes Clusterverfahrens ist daher das Maß für die Ähnlichkeit der Elemente, die sogenannte Distanznorm. Diese muss für die Anwendung am Funktionsnetzwerk entsprechend formuliert werden.

Ein guter Überblick über die grundsätzlichen Unterschiede der verschiedenen Verfahren ist in [216] enthalten. Eine gute Einführung findet sich außerdem in [217]. Die grundlegendste Unterscheidung ist die in parametrische und nicht-parametrische Verfahren. Zu den nicht-parametrischen Verfahren zählen die hierarchischen Algorithmen, die auf der Distanz zwischen Elementen basieren. Dadurch liefern sie eine Gruppierung auf verschiedenen Ebenen, da bei Betrachtung unterschiedlicher Entfernungen andere Gruppierungen entstehen. Cluster einer Ebene werden auf einer höheren Ebene wieder zusammengefasst. Die Algorithmen dieser Familie unterscheiden sich daher im Wesentlichen bei der Definition der Distanz. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist das Vorgehen als Bottom-Up-Algorithmus, der Elemente gruppiert oder als Top-Down-Algorithmus, der die Gesamtmenge auf trennt. Eine bekannte Darstellung für die Baumstrukturen solcher Verfahren sind Dendrogramme. Ein Beispiel zeigt Abbildung 192 [218]:

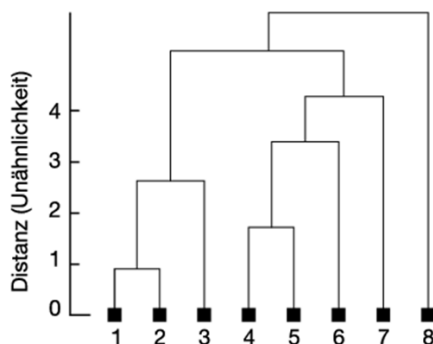


Abbildung 192: Dendrogramm [218]

Parametrische Clusterverfahren sind Optimierungsverfahren mit denen versucht wird, eine Kostenfunktion zu minimieren. Dafür werden die Kosten jeder Gruppenzuordnung eines Elements berechnet. Innerhalb der Familie der parametrischen Clusterverfahren muss zwischen wahrscheinlichkeitsbasierten oder weichen Verfahren und partitionierenden oder harten Verfahren unterschieden werden. Bei ersteren wird der Grad der Zugehörigkeit zu einer Menge, z.B. über Wahrscheinlichkeiten bestimmt. Bei letzteren wird eine harte Trennung und eindeutige Zuordnung durchgeführt. Der grundlegende Unterschied der verschiedenen partitionierenden Verfahren ist die Realisierung der Kostenfunktion. In dieser Familie der partitionierenden Verfahren finden sich die bekanntesten Algorithmen, wie K-Means oder K-Medoid. Nach [219] werden bei der K-Means Clusterung n Beobachtungen in k Cluster $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ aufgeteilt. Dabei wird die Quadratsumme der Abstände innerhalb eines Clusters minimiert. Der Algorithmus ordnet jeden Datenpunkt einer Menge von gewählten Startzentren zu. Danach wird der Clustermittelpunkt durch Mittelwertbildung neu bestimmt und die Zuordnung wiederholt. Es gilt für die Kostenfunktion:

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad \text{Gl. 99}$$

Dabei ist μ der Durchschnitt (mean) der Punktabstände in S_i . Der Vorteil dieses Algorithmus ist die relativ einfache Implementierung und seine hohe Verbreitung. Die Nachteile sind laut [216] die Rechenintensität und die Abhängigkeit der Ergebnisgüte von den gewählten Startzentren.

Aus den beschriebenen Grundlagen wird deutlich, dass das Ähnlichkeitsmaß mit dem die Datenelemente einer Menge bewertet werden, eine hohe Bedeutung hat. Für die beschriebenen Algorithmen wird eine Fülle verschiedener Distanznormen verwendet, die in der Regel auf bestimmte Anwendungen ausgerichtet sind.

14.2 Matrixbasierte Verfahren

Die bereits angesprochenen matrixbasierten Verfahren basieren auf einer Systemdarstellung als quadratische Matrix. Die Zeilen und Spalten der Matrix repräsentieren die Systemelemente, die bearbeitet werden sollen. Dies können physikalische Komponenten oder Systemfunktionen sein. Auch Abhängigkeiten zwischen Arbeitsschritten können in Matrixdarstellung erfasst werden. Die Einträge der Matrix repräsentieren die Beziehung zwischen den Elementen. Dabei werden sowohl binäre Einträge („Element A ist verbunden mit Element B“) verwendet, als auch skalare Einträge, die eine Gewichtung repräsentieren. Eine solche Matrix wird auch als Design Structure Matrix bezeichnet. Abbildung 193 zeigt ein Beispiel nach [220] für eine Binärmatrix:

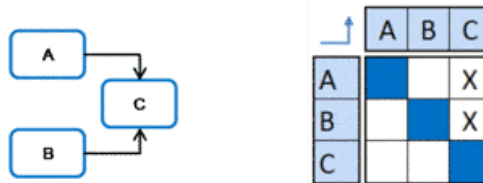


Abbildung 193: Netzwerk und zugehörige Design Structure Matrix [220]

Die Grundlage für das Arbeiten mit der Design Structure Matrix ist einerseits die Identifikation der Elemente, die Komponenten, Module, Funktionen, etc., sein können. Andererseits sind die Identifikation der Elementverbindungen und auch der Typ der Elementverbindungen wichtig. In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Ansätzen zur konkreten Realisierung der Design Structure Matrizen.

Ein Verfahren, bei dem funktionale Anforderungen für ein Produkt definiert werden, beschreibt [40]. Diesen funktionalen Anforderungen werden physikalische Systemkomponenten zugeordnet. Im Anschluss werden die Interaktionen zwischen den Komponenten manuell definiert. Die dadurch aufgebaute Matrix kann nun zur Modulidentifikation genutzt werden. Die manuelle Definition von Interaktionen schafft allerdings eine natürliche Grenze für die Anzahl der Elemente, die der Nutzer sinnvoll bearbeiten kann. In [40] wird zudem nicht nach dem Typ der Interaktion unterschieden.

Dagegen liefert [28] eine Möglichkeit die Matrixverbindungen über die rein binäre Anwendung hinaus zu erweitern. Die Verbindungen in ihren Matrizen werden immer mit vier Zahlenangaben gefüllt, die unterschiedliche physikalische Domänen repräsentieren. Ein solcher Matrixeintrag ist in Abbildung 194 dargestellt:

Spatial:	S	E	:Energy
Information:	I	M	:Materials

Abbildung 194: DSM-Eintrag in vier Kategorien nach [28]

Für die einzelnen Einträge wird zudem eine fünfstufige Skala definiert (+2: Benötigt, +1: Gewünscht, 0: Egal, -1: Unerwünscht, -2: Schädlich), die die Verbindung weiter charakterisiert. Obwohl der Aufwand bei der Strukturerstellung erhöht wird und stark von der Einschätzung des Entwicklers abhängt, so ist die Genauigkeit der Systembeschreibung doch nennenswert erhöht.

Die Herleitung der Matrixeinträge erfolgt im Ansatz von [39] automatisiert. Anstelle von Expertenwissen wird ein Funktionsmodell verwendet um Verbindungen zwischen Systemkomponenten herzustellen. Dazu wird eine Funktionshierarchie aufgebaut. Die unterste Funktionsebene wird mit physikalischen Zuständen gleichgesetzt. Danach werden diese physikalischen Zustände mit Komponenten verbunden. Es entsteht eine indirekte Verbindung der Komponenten über die

Funktionsebene. Die Verbindungen und auch die Anzahl der überbrückten Elemente werden als Matrixeinträge ausgewertet. Die Länge der Verbindungswege wird zusätzlich gewichtet und so die Grundlage für einen Clusteralgorithmus geschaffen.

Die Clustering in matrixbasierten Verfahren erfolgt immer als Permutation von Zeilen und Spalten. Dabei wird die Matrix diagonalisiert: es werden Einträge nahe der Hauptdiagonalen gesammelt. Dabei entstehen dann Häufungen, die als Modul interpretiert werden können. Dies ist generisch in Abbildung 195 dargestellt:

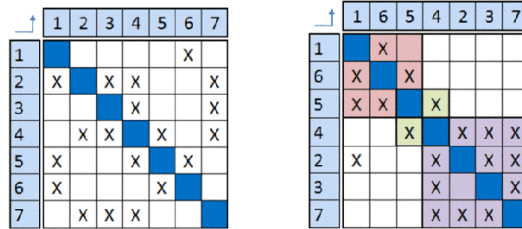


Abbildung 195: Matrix vor und nach der Diagonalisierung zur Modulidentifikation [220]

Die Diagonalisierung ist nicht die einzige Matrixoperation, die mit einer Design Structure Matrix durchgeführt werden kann. Eine andere Matrixoperation ist beispielsweise die Triangularisierung. Dabei werden die Matrixeinträge in die obere Dreiecksform gebracht. Dies schafft eine Struktur, die wenig Feedback enthält. Sie wird beispielsweise zum Ordnen von Prozessschritten verwendet, deren Abhängigkeiten zuvor in Matrixform erfasst wurden. Die Algorithmen, die zur Diagonalisierung verwendet werden, sind im Wesentlichen Optimierungsverfahren, die den Abstand von der Hauptdiagonale mit einer Straffunktion belegen. Formal dargestellt wird dieses Vorgehen beispielsweise in [27]:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (|j - i| \times w_{i,j}) \quad \text{Gl. 100}$$

Dabei ist N die Anzahl der Matrixeinträge, i die Zeilenanzahl, j die Spaltenanzahl und w die Gewichtung bzw. die Straffunktion.

Die Permutation der Matrix ist jedoch nur der erste Bearbeitungsschritt. Der nachfolgende Arbeitsschritt ist die automatisierte Erkennung von Modulen. Dazu wird in der Literatur eine Vielzahl von Kennzahlen aufgeführt, die entweder nach der Matrixbearbeitung angewendet werden oder bereits in den Algorithmen integriert sind. Eine umfassende Auflistung findet sich in [39]. Den sogenannten Module Strength Indicator (MSI) führt [27] ein. Diese Kennzahl addiert Verbindungen innerhalb und außerhalb eines Moduls und dividiert diese mit der Anzahl der Modulelemente innerhalb und außerhalb der Module. Diese Bewertung ist die Grundlage vieler anderer Kennzahlen. Die Berechnung für modulinterne Elemente zeigt Gl. 101. Die Berechnung für modulexterne Elemente ist analog und kann [27] entnommen werden.

$$MSI_i = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} \sum_{j=n_1}^{n_2} w_{ij}}{(n_2 - n_1 + 1)^2 - (n_2 - n_1 + 1)} \quad \text{Gl. 101}$$

Dabei ist n_1 das erste Element und n_2 das letzte Element innerhalb eines Moduls. Die Kennzahl „Total Coordination Cost“ verwendet [221]. Diese ist ebenfalls ein Maß für die Bewertung von Verbindungen innerhalb eines Moduls und außerhalb eines Moduls. Diese Bewertung erweitert [40] um die „Likeness Measure“. Dabei werden die Modularisierungen nach verschiedenen Durchläufen seines Algorithmus verglichen.

Die direkte Einbindung der Modulbewertung in den Strukturierungsalgorithmus ist sinnvoll um eine höhere Ergebnisgüte zu erreichen. Daher wird für die Bearbeitung der Funktionsnetzwerke in dieser Arbeit ein Verfahren nach [40] erprobt.

14.3 Implementierung des Clusterungsverfahrens

14.3.1 Auswahl der Distanznorm für den Clusteralgorithmus

Nach der Vernetzung der Funktionsketten und dem Import in die matrixbasierte Verarbeitung in Matlab muss ein Ähnlichkeitsmaß, eine sogenannte Distanznorm für die Funktionsterme definiert werden. Aufgrund der mehrdimensionalen Matrixdarstellung ist ein Standardmaß, wie die euklidische Distanz nicht geeignet. Vielmehr wird das Auftreten von Einsen und Nullen in den einzelnen Matrixzeilen nach Gesetzen der Mengenlehre verglichen. Für die einzelnen Vektorzeilen der Matrix wird ein geeignetes Ähnlichkeitsmaß gesucht. Eine Zeile der Matrix entspricht daher einer binären Codierung für das Funktionselement. In [39] wird diese Vorgehensweise genutzt um Matrixeinträge mit der sogenannten Jaccard-Distanz zu bewerten. Die Jaccard-Distanz ist nach [222] ein Maß für die Ungleichheit von Mengen und ist definiert als:

$$J_d = 1 - J(X, Y) = \frac{|X \cup Y| - |X \cap Y|}{|X \cup Y|} \quad \text{Gl. 102}$$

Dabei sind X und Y zwei beliebige Elementmengen. Das Maß ist also im Wesentlichen ein Vergleich von Schnitt- und Vereinigungsmenge. Andere Distanznormen, die für binäre Vektoren verwendet werden können, sind die Hamming-Distanz oder die Dice-Distanz. Die Hamming-Distanz ist definiert als die Anzahl der Elemente des Binärstrings, die sich unterscheiden. Sie lautet damit für Elemente der Mengen X und Y nach [222]:

$$\Delta(x, y) := \sum_{x_i \neq y_i} 1, i = 1, \dots, n \quad \text{Gl. 103}$$

Die Hamming-Distanz ist aufgrund des reinen elementweisen Vergleichs für beliebige Zeichenketten verwendbar. Die Dice-Distanz ist der Jaccard-Distanz sehr ähnlich und lautet nach [222]:

$$d = 1 - \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|} \quad \text{Gl. 104}$$

Weitere Ähnlichkeitsmaße können für Binärvariablen gebildet werden. Eine Auflistung findet sich z.B. in [223].

Nach den vorangegangenen Überlegungen lassen sich folgende Anforderungen für die Ähnlichkeitsmessung innerhalb der Funktionsnetze festhalten:

- Die Distanznorm muss beide Matrixausgaben (Kontrollfunktionsmatrix und Verhaltensflussmatrix) sinnvoll verarbeiten können, auch wenn Matrixeinträge über viele identische Elemente verfügen.
- Die Implementierung muss über eine hohe Rechengeschwindigkeit verfügen, da die Anzahl der zu berechnenden Distanzen mit der Funktionszahl exponentiell steigt (Bei einer Funktionsanzahl n gilt für die Anzahl der Verbindungen c : $c = n(n - 1)/2$). Alle Abstände müssen für jeden Clusterungsschritt wiederholt werden.
- Das Distanzmaß muss sich sinnvoll in eine Straffunktion einbinden lassen um ein Clusterungsverfahren aufzubauen, das für die Systempartitionierung gute Ergebnisse liefert.

In der Implementierung des Clusteralgorithmus werden alle genannten Kennzahlen rechnerisch bestimmt. Im experimentellen Vergleich muss sich dann zeigen, welches Maß für die Bearbeitung des Funktionsnetzwerks am geeignetsten ist. Eine entsprechende Straffunktion wird im Anschluss formuliert.

14.3.2 Implementierung der Distanznorm

Zur experimentellen Erprobung der Clusterverfahren wurden vier verschiedene Distanznormen implementiert. Die Jaccard-Distanz, die Simple-Matching-Distanz, die Dice-Distanz und die Tanimoto-Distanz. Diese können alle auf die Funktionsmatrix angewendet werden. Jede verfügbare Funktionsmatrix mit n Elementen (Zeilen) und p Dimensionen (Spalten) kann mit dem implementierten Cluster-Verfahren verarbeitet werden. Die Matrix der Kontrollfunktionen $CN_{n,p}$, die Matrix aller

Verbindungen $V_{n,p}$ und die Kombinationsmatrix aus Kontrollfunktionen und Systemaktivitäten $CNACT_{n,p}$.

Die Funktionsmatrix wird zeilenweise untersucht. Dadurch wird eine Abstandsmatrix $D_{Elemente\ ij}$ jedes Funktionselements zu jedem anderen Funktionselement erzeugt, wie in Gl. 105 dargestellt:

$$D_{Elemente\ ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i1} & \dots & d_{ij} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 105}$$

Eine Besonderheit gilt bei der Verarbeitung der kombinierten Matrix aus Kontrollfunktionen und Systemaktivitäten. In diesem speziellen Fall wird ein zusätzlicher Gewichtungsvektor C aus dem Netzwerk der Systemaktivitäten gebildet. Dieser hat das Ziel, die Abstandsmatrix $D_{Elemente\ ij}$ so zu manipulieren, dass ein enger Zusammenhang im Aktivitätsnetzwerk das Ergebnis der späteren Clusterung beeinflusst. Der Gewichtungsvektor C hat also die Aufgabe einer Straffunktion. Ein stark vernetztes Aktivitätselement soll dazu führen, dass auch die zugehörigen Kontrollfunktionen stärker gebunden werden.

Daher muss der Einfluss jedes Funktionselements auf die Systemaktivitäten in der Matrix $CNACT_{n,p}$ mit einer geeigneten Kennzahl bewertet werden. Dazu wird der Grad der Funktionselemente bestimmt. Der Grad eines Graphen bezeichnet nach [113] die Anzahl der an einen Knoten angeschlossenen Kanten. Die Summe der ausgehenden Kanten wird hier für jedes Funktionselement bestimmt. Mit der Anzahl der Systemaktivitäten a lässt sich nun die in Gl. 106 dargestellte Kennzahl für die lokale Beeinflussung der Aktivitäten durch eine Kontrollfunktion bilden.

$$\sigma = \frac{grad^-}{a} \quad \text{Gl. 106}$$

Mit einem zusätzlichen exponentiellen Zusammenhang wird nun die in Gl. 16 dargestellte Straffunktion C gebildet. Der exponentielle Zusammenhang führte in Versuchen zu den besten Ergebnissen.

$$C = \frac{1}{10^\sigma} \quad \text{Gl. 107}$$

Der Vektor C wird bei der späteren Clusterung in jedem Rechenschritt zur Gewichtung der Abstandsmatrix zu den Clusterzentren verwendet und beeinflusst dadurch das Rechenergebnis.

14.3.3 Implementierung des Clusteralgorithmus

Der K-Means-Algorithmus benötigt wie in [219] beschrieben, zur Clusterung die Vorgabe der Clusteranzahl k und geeignete Startwerte für die Clustermittelpunkte, die für die iterative Distanzminimierung verwendet werden. Die Standardimplementierungen des K-Means-Algorithmus, z.B. [224], verwenden zufällig generierte Zentren und eine manuelle Vorgabe der Clusteranzahl. Als Verbesserung und Erleichterung für den Nutzer soll die Vorauswahl der Clustermittelpunkte, das so genannte Seeding hier durch eine Vorbearbeitung erleichtert werden. Dazu wurde das folgende Vorgehen definiert:

1. Untersuchung der Abstandsmatrix $D_{Elemente\ ij}$ und Suche von Funktionselementen mit vielen kurzen Abständen zu vielen anderen Funktionselementen. Diese müssen in einer Anhäufung von Punkten liegen. Es wird der mittlere Abstand zu allen anderen Punkten gebildet
2. Aufbau von Dendrogrammen um zusätzlich die Struktur der Abstandsmenge zu visualisieren
3. Manuelle Nutzereingabe der gewünschten Anzahl k an Clustern
4. Auswahl der k Elemente mit den kürzesten mittleren Abständen ihren Nachbarn

In Abbildung 196 ist beispielhaft eine Verteilung aller Distanzen wie sie in Schritt 1 aufgebaut wird, dargestellt (Die x-Achse hat keine Bedeutung). Es fällt auf, dass die Werte relativ eng aneinander liegen. Dennoch lässt sich eine Rangfolge der Funktionselemente herstellen.

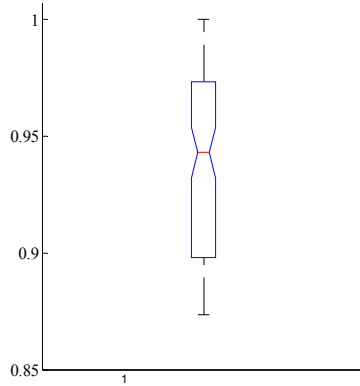


Abbildung 196: Verteilung der vorhandenen mittleren Distanzen der Kontrollfunktionen

Die Dendrogramme werden mit den vorhandenen Matlab-Funktionen „Linkage“ und „Dendrogram“ erzeugt. Diese werden in [225] detailliert beschrieben. Wichtig ist zu erwähnen, dass der hierarchische Baum des Dendrogramms ebenfalls mit verschiedenen Abstandsmaßen erstellt werden kann. Die Verwendung der „*Unweighted average distance*“ lieferte die besten Ergebnisse. Ein Beispiel für die erstellten Baumstrukturen zeigt Abbildung 197. In der Abbildung ist die Visualisierung von vier verschiedenen Abstandsmatrizen gegenübergestellt.

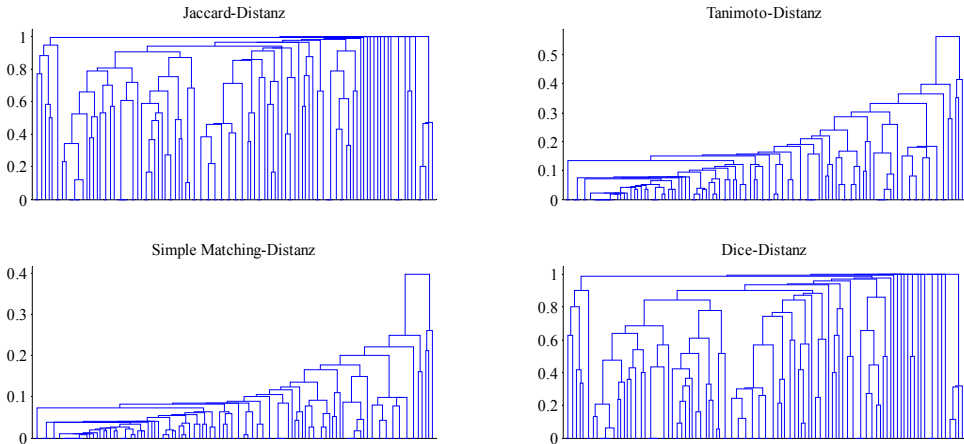


Abbildung 197: Dendrogramme der unterschiedlichen Abstandsmatrizen

Die hohe Zahl der Funktionen wird nicht einzeln dargestellt. Sie sind teilweise bereits zusammengefasst. Nach oben hin werden die Gruppen immer weiter zusammengefasst. Die Höhe der Linien repräsentiert den Abstand zwischen den Elementen, die zusammengefasst werden. Auf Basis dieser Darstellungen soll im Experiment nach 8 – 10 Clustern gesucht werden.

Mit der Anzahl der Clusterzentren kann der K-Means-Algorithmus durchlaufen werden. Die Implementierung basiert auf der iterativen Realisierung von [226]. Mit den Funktionen zur Abstandberechnung und zum Seeding ergibt sich ein relativ einfaches Verfahren:

1. Einlesen der gewünschten Anzahl an Clustermittelpunkten
2. Bestimmung der Initialzentren
3. Berechnung der Abstände aller Funktionselemente zu den Zentren: Alle Abstände zu den Zentren werden in einer Abstandsmatrix nach Gl. 108 ermittelt:

$$D_{\text{centroids } ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i1} & \dots & d_{ij} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 108}$$

4. Zuordnung zu den Clustern: Alle Funktionselemente werden dem ihnen am nächsten gelegenen Zentrum zugeordnet, wie in Gl. 109 dargestellt:

$$\text{Cluster} = (j | \min(d_{11} \dots d_{1j})) \quad \text{Gl. 109}$$

5. Bestimmung des Abstands zum Clustermittelpunkt: Für alle Clustermittglieder p wird der Abstand zum jeweiligen Clusterzentrum k ausgewählt und in der Matrix D_{Zentrum} dargestellt.

$$D_{\text{Zentrum}} = [d(p_i; k_i)] \quad \text{Gl. 110}$$

6. Neuberechnung der Clusterzentren. Innerhalb jedes Clusters wird jetzt ein neues Zentrum bestimmt. Bei gewöhnlichen K-Means-Algorithmen mit euklidischem Distanzmaß wird dazu der Mittelwert (Mean) aller Abstände bestimmt und ein neuer Punkt definiert. Für die betrachteten Funktionselemente muss dagegen eine geeignete Auswahl eines vorhandenen Elements stattfinden. K-Means-Varianten, bei denen vorhandene Punkte gewählt werden, werden als K-Medoid-Algorithmen bezeichnet. Für die Elementwahl ergeben sich die nachfolgenden Schritte.
7. Bestimmung des komponentenweisen Medians zum aktuellen Clustermittelpunkt für die binären Elemente innerhalb jedes Clusters K nach Gl. 111

$$k_{\text{median}} = \text{median}(D_{\text{Zentrum}}(K_i)) \quad \text{Gl. 111}$$

8. Berechnung der Abstände der Clustermittglieder zu diesem Medianwert

$$D_{p_i, \text{median}} = [d(p_i, k_{\text{median}})] \quad \text{Gl. 112}$$

9. Auswahl des Elements mit dem kleinsten Abstand als neues Clusterzentrum

$$\text{Zentrum} = (k | \min(D_{\text{median}})) \quad \text{Gl. 113}$$

10. Berechnung der aufsummierten Abstände innerhalb der Cluster (Intra-Cluster-Distances). Diese Größe soll von dem Algorithmus minimiert werden und dient somit als Abbruchkriterium für die Iteration.

$$\sum D_{\text{centroid}} \quad \text{Gl. 114}$$

11. Iterative Wiederholung. Erneute Abstandsberechnung und Gruppierung. In der Implementierung wird der Durchlauf beendet, wenn die Summe aller Distanzen zu den Zentren nach Gl. 114 sich nicht mehr verändert. Dadurch ist klar, dass kein Element mehr die Gruppe wechselt

Die beschriebene Implementierung kombiniert eine bekannte Schrittfolge mit angepasster Distanzberechnung und Elementwahl. Gemeinsam mit der realisierten Vorauswahl geeigneter Startpunkte kann dadurch ein schneller Durchlauf mit einer geringen Schrittzahl realisiert werden.

14.3.4 Auswahl des matrixbasierten Verfahrens

Das Verfahren nach [40], das auf der Arbeit von [221] basiert, arbeitet wie folgt:

1. Jedes Element wird zunächst als Cluster interpretiert
2. Berechne die Gesamtkosten $\text{Total cost} = \text{IntraClusterCost} + \text{ExtraClusterCost}$ für die Clustermatrix wie folgt:

$$\text{IntraClusterCost} = (DSM(j, k) + DSM(k, j)) \cdot \text{Clustersize}(y)^{\text{powcc}}$$

$$\text{ExtraClusterCost} = (DSM(j, k) + DSM(k, j)) \cdot \text{DSMSize}^{\text{powcc}}$$

(Dabei sind $DSM(j, k)$ und $DSM(k, j)$ die Interaktionen in der Design Structure Matrix, $DSMSize$ und $Clustersize$ die Elementanzahlen in der Matrix und in einem Cluster und powcc ein Straffaktor für große Cluster)

3. Wähle ein beliebiges Element
4. Berechne Gebote aller Cluster für das ausgewählte Element wie folgt:

$$\text{ClusterBid}_j = \frac{(\text{inout})^{\text{powdep}}}{(\text{Clustersize}_j)^{\text{powbid}}}$$

(Dabei ist inout die Anzahl der Verbindungen zwischen dem gewählten Element und allen Clus-

terelementen. *powdep* dient der Verstärkung der Interaktionswirkung und *powbid* der Bestrafung großer Cluster)

5. Wähle Zufallszahl zwischen 1 und *rand_bid* (eingestellter Parameter)
6. Berechne die Gesamtkosten für den Fall, dass das gewählte Element dem Cluster mit dem höchsten Gebot zugeschlagen wird. Verwende nur das zweithöchste Gebot, wenn die Zufallszahl aus Schritt 5 identisch mit *rand_bid* ist (Dadurch wird vermieden nur ein lokales Optimum einzugrenzen)
7. Wähle Zufallszahl zwischen 1 und *rand_accept* (eingestellter Parameter)
8. Wenn die neuen Gesamtkosten niedriger als die bisherigen Gesamtkosten sind oder wenn das Ergebnis aus Schritt 7 identisch ist mit *rand_accept*, wird das Element dem Cluster zugeordnet. (Durch *rand_accept* wird ebenfalls vermieden, nur ein lokales Optimum einzugrenzen).
9. Wiederholung ab Schritt 3

Für den Algorithmus und eine etwas erweiterte Version wurden verfügbare Implementierungen aus [116] verwendet.

14.3.5 Implementierung des matrixbasierten Verfahrens

Zur Verwendung der Standardalgorithmen nach [116] wird lediglich die Abhängigkeitsmatrix der Funktionen zu einer echten Design Structure Matrix umgeformt. Dazu wird die Hauptdiagonale mit Einsen gefüllt. Außerdem wurde eine Ausgabe der Funktionslisten innerhalb eines Clusters ergänzt. Das Sortiervfahren kann nach diesen Ergänzungen direkt angewendet werden.

15 Anhang E

15.1 Statistische Parametrierung der Fahrzeugbetriebspunkte

Um im Rahmen der physikalischen Auslegung, geeignete Fahrzeugbetriebspunkte für die stationäre Simulation zu erhalten, wird eine Datenbank von Fahrzyklen verwendet, auf die über eine statistische Auswahl zugegriffen wird. Insgesamt sind 20 Zyklen hauptsächlich mit hohen Dynamikanforderungen oder Aufzeichnungen von Messfahrten aus [167] hinterlegt. Zur Auswahl wird eine Klassifizierung in drei Streckentypen (Stadt, Landstraße, Autobahn) verwendet. Jedem Streckentyp ist eine Sammlung von Zyklen zugeordnet, jeder Zyklus ist mit Sollgeschwindigkeit und elektrischer Bedarfsleistung gespeichert. Die elektrische Bedarfsleistung wurde per Längsdynamiksimulation aufgezeichnet und wird dem Simulationsmodell als Eingangsgröße übergeben. Dadurch werden die höchsten Leistungen im Fahrzyklus berücksichtigt, die bei dynamischen Beschleunigungsvorgängen auftreten. Abbildung 198 zeigt ein Beispiel für eine aufgezeichnete elektrische Bedarfsleistung:

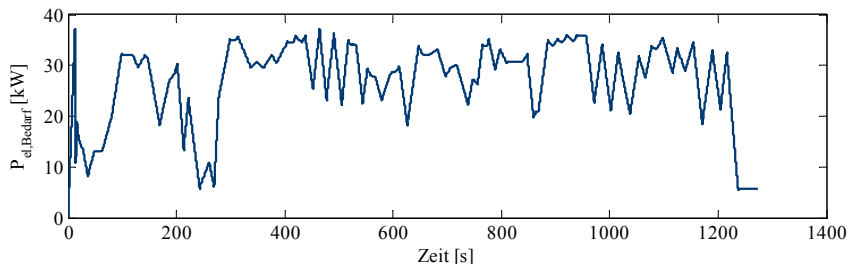


Abbildung 198: Elektrische Bedarfsleistung bei Zyklusfahrt (Grossglockner-Auffahrt)

Für die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens eines Zyklustyps gilt nach [167]:

$$\text{Summe Wahrscheinlichkeiten} \quad p_{\text{Stadt}} + p_{\text{Landstraße}} + p_{\text{Autobahn}} = 1 \quad \text{Gl. 115}$$

Um die einzelnen Auftretenswahrscheinlichkeiten zu bestimmen verwendet [167] die Fahrstrecken der hinterlegten Zyklen in den verschiedenen Streckentypen. Dabei wird eine Streckenverteilung von 33 % Stadtfahrt, 46 % Überlandfahrt und 21 % Autobahnfahrt zugrunde gelegt. Nach [167] gilt:

$$\text{Wahrscheinlichkeit Zyklustyp} \quad p_{z, \text{korrigiert}} = D_{\text{ges}} \cdot \frac{p_z}{\mu(\bar{d}_z)} \quad \text{Gl. 116}$$

Mit:	D_{ges} :	Erwartungswert der Gesamtstrecke	p_z :	Wahrscheinlichkeit Zyklustyp z	$\mu(\bar{d}_z)$:	Mittelwert der Distanzen des hinterlegten Zyklustyps z
------	--------------------	----------------------------------	---------	----------------------------------	--------------------	--

Dabei gilt für den Erwartungswert der Gesamtstrecke [167]:

$$\text{Erwartungswert Gesamtstrecke} \quad D_{\text{ges}} = \left(\frac{p_{\text{Stadt}}}{\mu(\bar{d}_{\text{Stadt}})} + \frac{p_{\text{Landstraße}}}{\mu(\bar{d}_{\text{Landstraße}})} + \frac{p_{\text{Autobahn}}}{\mu(\bar{d}_{\text{Autobahn}})} \right)^{-1} \quad \text{Gl. 117}$$

Auf Basis der entsprechend Gl. 67 korrigierten Werte wird vor der Simulation ein Wert zwischen null und eins aus einer Normalverteilung gelöst. Damit steht entsprechend Gl. 115 der Zyklustyp fest. Innerhalb des Zyklustyps wird über eine weitere Normalverteilung ein Zyklus aus der Liste festgelegt; es gilt also die gleiche Wahrscheinlichkeit für alle Zyklen einer Kategorie. Nach der Auswahl des Zyklus werden mehrere Lastpunkte entsprechend der eingestellten Perzentile ausgewählt. In dieser Untersuchung werden drei Betriebspunkte mit den Perzentilen 100, 90 und 75 betrachtet. Das 100. Perzentil entspricht der maximal auftretenden Leistung, das 90. und 75. Perzentil sind die Punkte unterhalb derer 90 % bzw. 75 % aller auftretenden Leistungswerte liegen. Es gilt für die sich in der Simulation später ergebenden Parameterwerte also eine Abdeckung der Leistungsanforderungen zu 100 %, 90 % oder 75 %. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 199 eine Zyklusauswahl für zehn geforderte Experimente dargestellt.

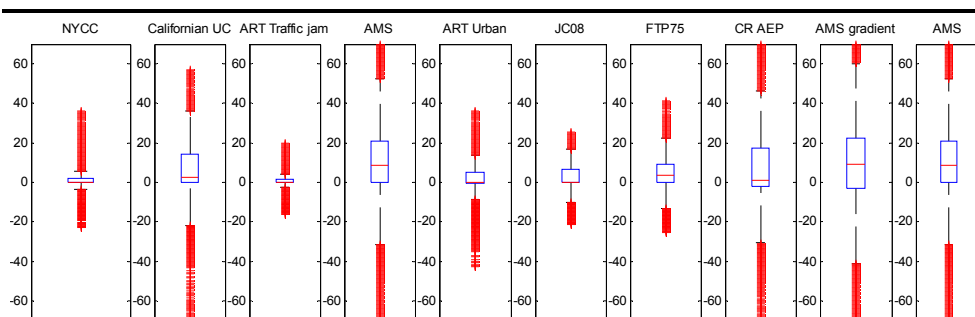


Abbildung 199: Statistisch ausgewählte Zyklen und die Spektren der elektrischen Bedarfsleistung

Die Boxplot-Darstellung aus Abbildung 199 zeigt graphisch das Spektrum der im Zyklus auftretenden Leistungen. Aus diesem Spektrum werden die Perzentile ausgewählt. Die Versuchsmatrix für die Simulation muss für jeden Punkt vollständig durchlaufen werden. Im hier betrachteten Anwendungsbeispiel verdreifacht sich daher die Anzahl der Simulationspunkte.

15.2 Statistische Parametrierung der Umweltparameter

Die Auswahl der Temperatur erfolgt nach dem Ansatz von [167] mit Quelldaten für eine Reihe weltweiter Regionen, die zu Beginn der Simulation festgelegt werden [134]. Häufige Szenarien werden dann berücksichtigt, wenn Uhrzeiten mit hohem Verkehrsaufkommen häufiger ausgewählt werden. Abbildung 200 veranschaulicht den Auswahlverlauf:

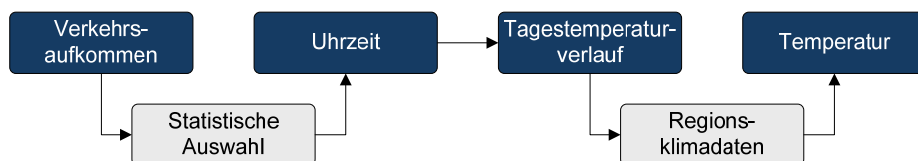


Abbildung 200: Auswahl der Temperaturdaten

Nach [167] lässt sich das tägliche Fahraufkommen durch zwei überlagerte Normalverteilungen mit einem Morgen-Maximum und einem Abend-Maximum annähern. Dies deckt sich mit den Darstellungen in [227]. Im ersten Schritt wird in der hier beschriebenen Realisierung gelöst, ob die Morgen- oder Abendkurve gewählt wird. Danach wird die Uhrzeit nach Gl. 118 bestimmt:

$$\text{Auswahl Tageszeit} \quad t_{FZ} = N \cdot \mu_{FZ} + \sigma_{FZ} \quad \text{Gl. 118}$$

Mit: N : Normalverteilte Zufallsvariable μ_{FZ} : Mittelwert der Fahrtzeitverteilung σ_{FZ} : Standardabweichung der Fahrtzeitverteilung

Für die ausgewählte Region liegen eine Verteilung der Tagesmitteltemperatur und eine Verteilung der täglichen Schwankungsbreite der Temperatur vor. Abbildung 97 zeigt ein Beispiel für Stuttgart:

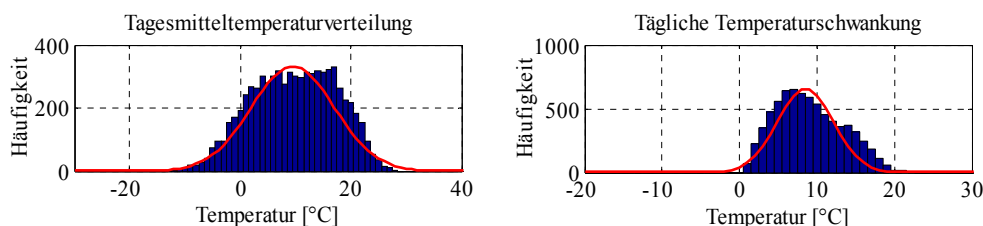


Abbildung 201: Temperaturstatistik für Stuttgart [134]

Auf Basis dieser Verteilungen kann für jede Tageszeit ein Temperaturwert berechnet werden, der für die Simulation benutzt wird. Wie schon bei der Auswahl der Fahrzyklen ist die Anzahl der Temperaturpunkte gleich der gewählten Experimentzahl x_{exp} .

16 Anhang F

16.1 Inhaltliche Übersicht der Entwurfsmethodik

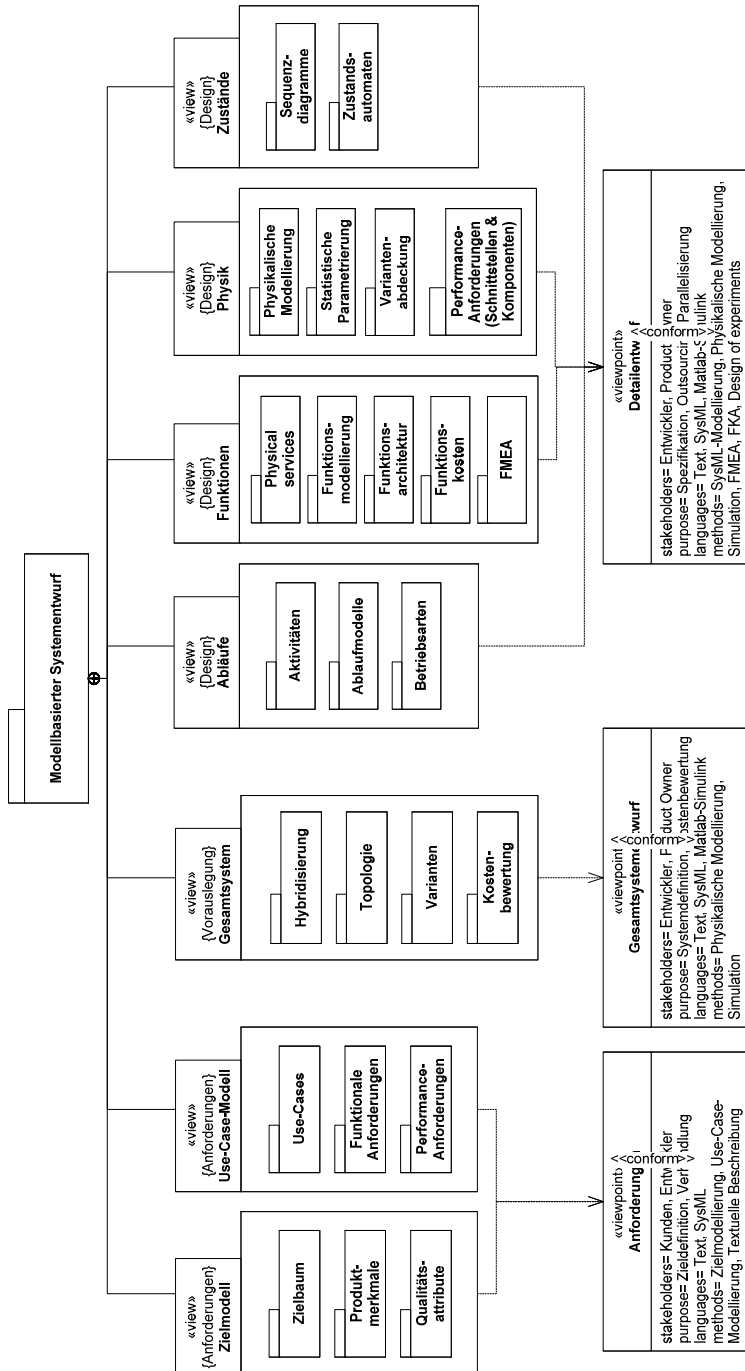


Abbildung 202: Packagediagramm aller Entwurfssichten der modellbasierten Methodik

16.2 Use-Case-Modell der Fahrzeugebene

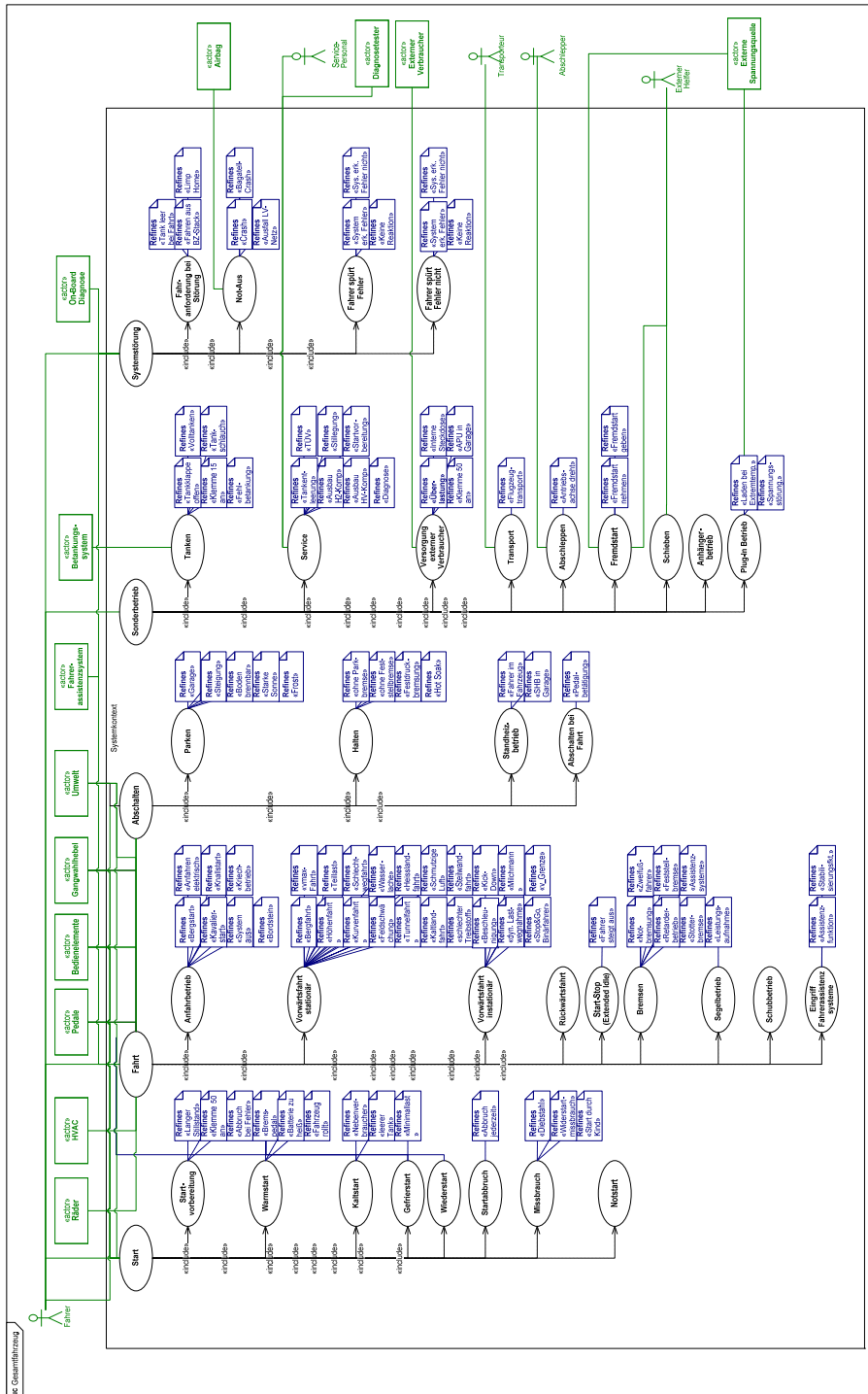


Abbildung 203: Use-Case-Modell der Gesamtfahrzeugebene

16.3 Physikalischer Kontext Betriebsart „Fahren“

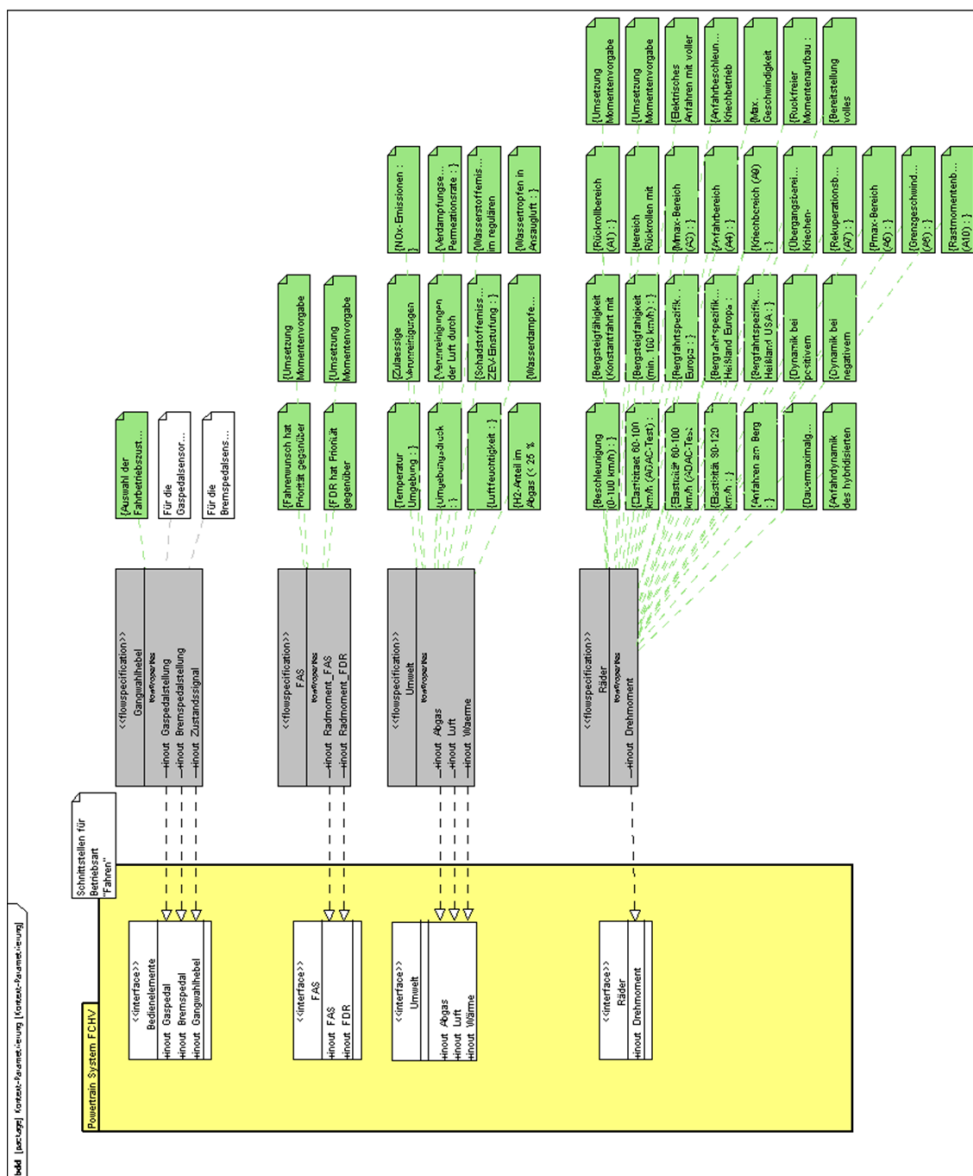


Abbildung 204: Physikalischer Kontext für die Betriebsart „Fahren“ (mit zugeordneten Anforderungen)

16.4 Darstellung der Funktionszerlegung

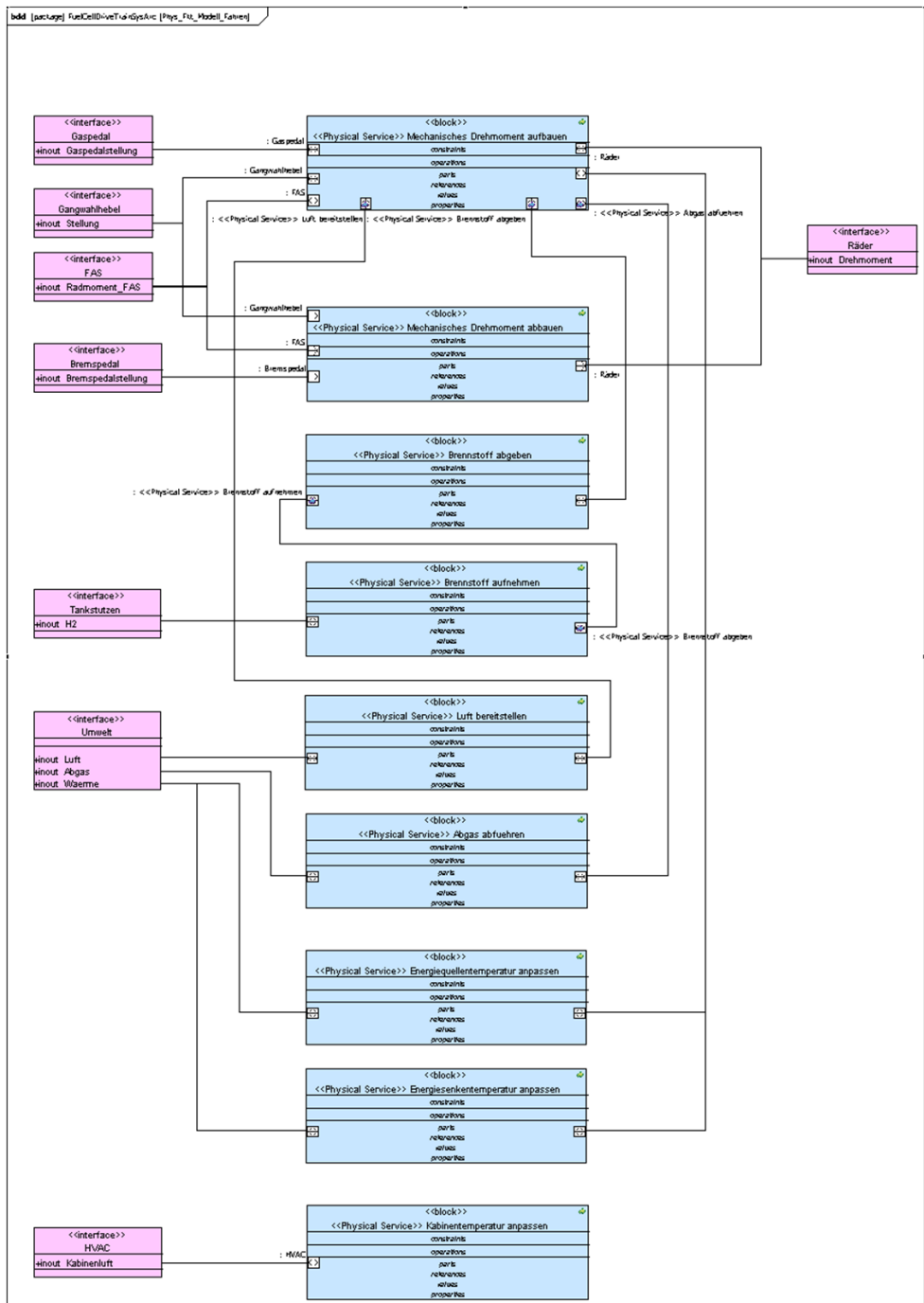


Abbildung 205: Servicezerlegung für die Betriebsart „Fahren“

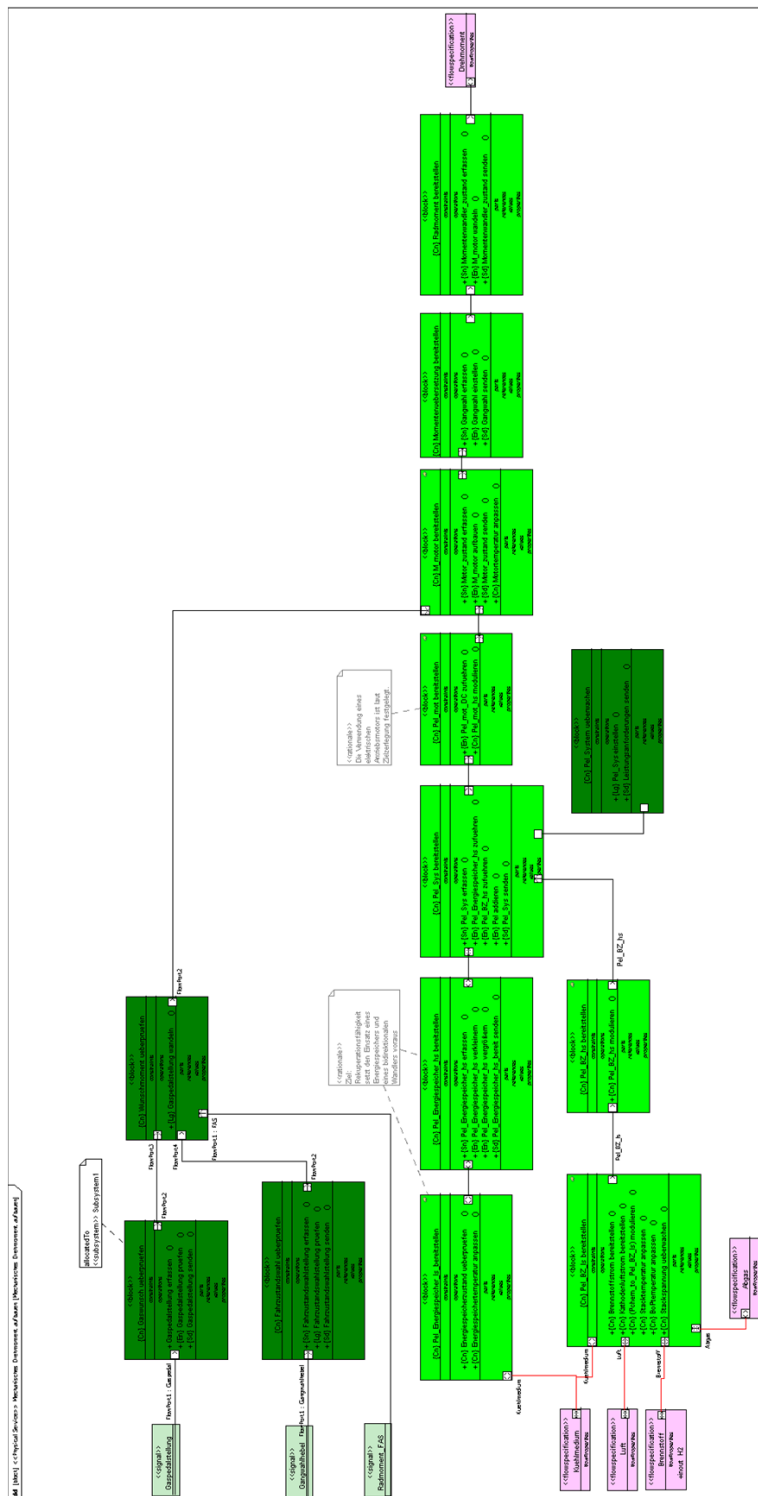


Abbildung 206: Funktionale Wirkkette des physikalischen Services „Drehmoment bereitstellen“

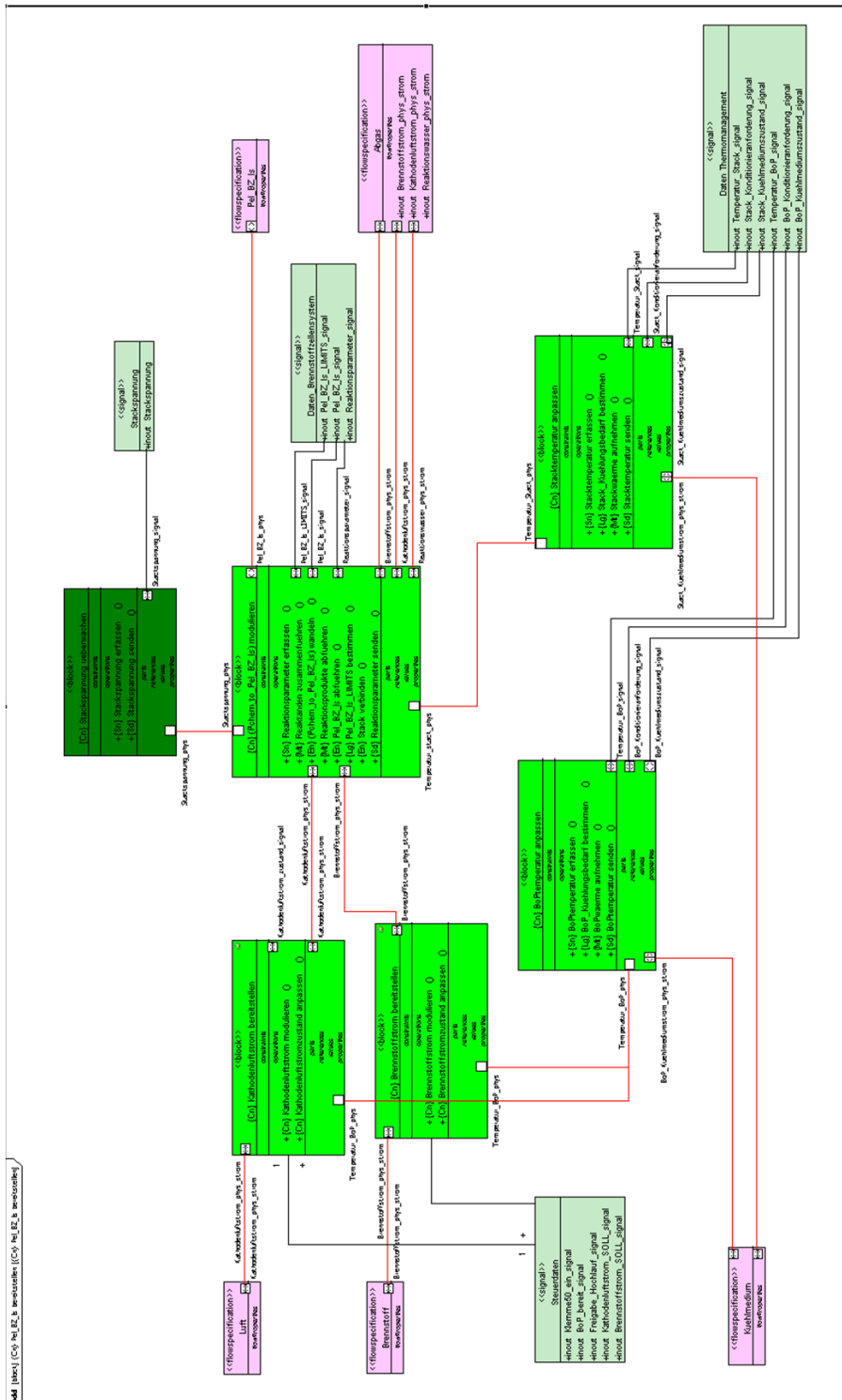


Abbildung 207: Detaillierung der Funktionszerlegung für das Brennstoffzellensystem

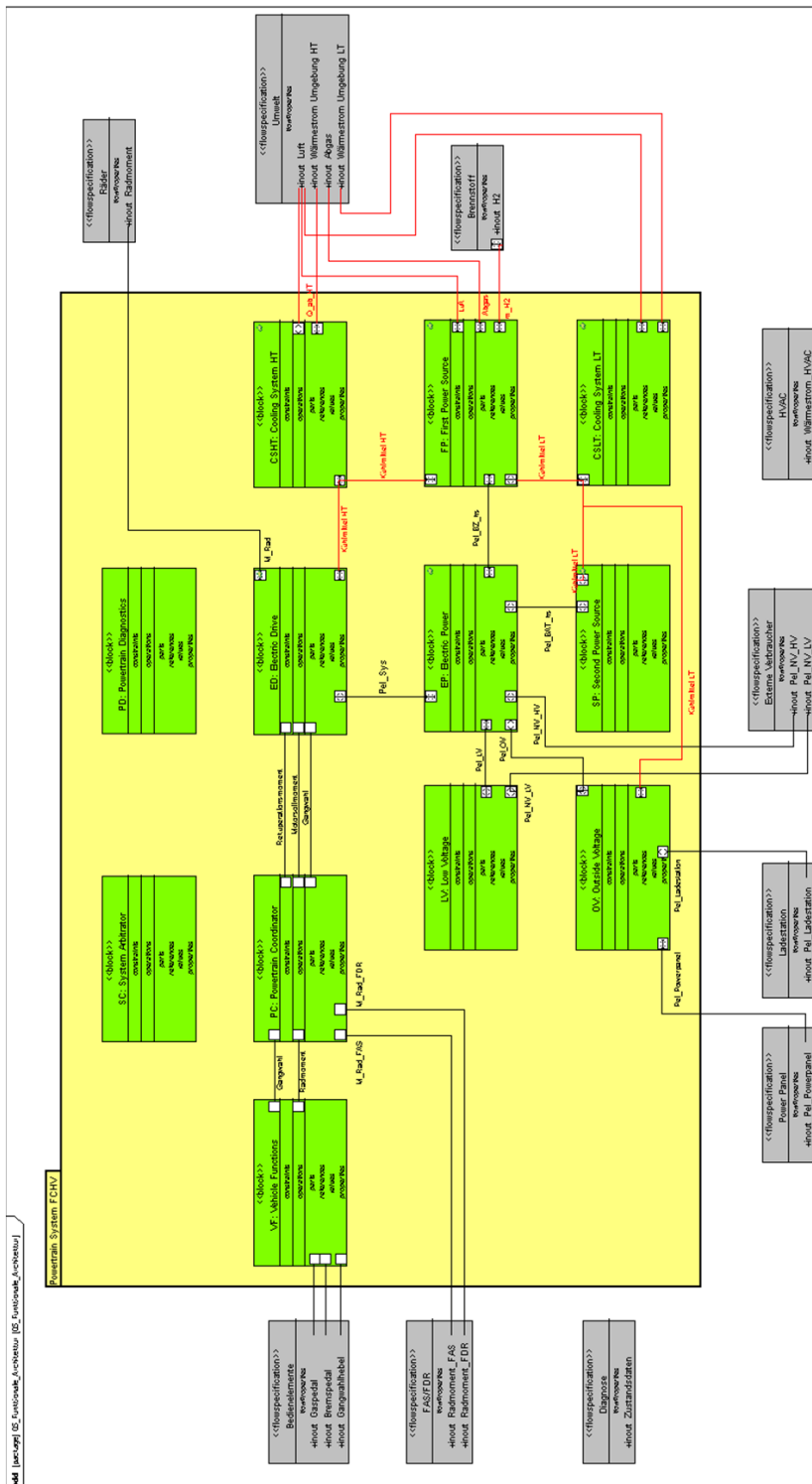


Abbildung 208: Funktionsarchitektur des elektrischen Antriebssystems mit Brennstoffzellen

16.5 Notationen der Funktionsmodellierung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Notationen und Methoden der Funktionsmodellierung miteinander verglichen. Die wesentlichen Eigenschaften sind in den folgenden Abschnitten aufgeführt:

- Die **Funktionsbeschreibung aus der Produktentwicklung** beruht auf Entwurfsverfahren aus der Konstruktionslehre, z.B. [20], [21], [228], [229]. Das Ziel ist stets, eine Zielfunktion soweit zu zerlegen, bis man Elementarfunktionen identifiziert hat, denen man Wirkprinzipien und damit Lösungsansätze zuordnen kann. Graphische Darstellungen finden sich in Form hierarchischer Funktionsbäume oder Netzwerke. Abbildung 209 zeigt ein Beispiel für eine Netzwerkdarstellung aus [21]:

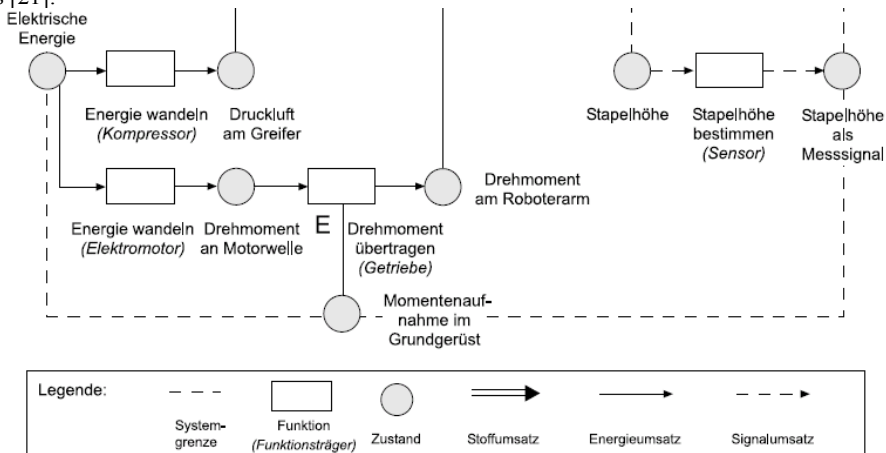


Abbildung 209: Beispiel eines umsatzorientierten Funktionsmodells für einen Palettierroboter [21]
Im Gegensatz zu anderen Darstellungen, werden hier zusätzlich Zwischenzustände identifiziert.

- Die Notation **IDEF0 (Integration Definition Function Modeling)** ist Teil einer ganzen Reihe von Modellierungssprachen. Sie wurde von der United States Air Force entwickelt um Systeme und Geschäftsprozesse zu modellieren. Die Notation basiert auf der älteren SADT (Structured Analysis and Design Technique), die für Anwendungen im Software Engineering entwickelt wurde [230]. Die Notation ermöglicht eine Modellierung hierarchischer Funktionsstrukturen durch das Einbetten von Untendiagrammen in einzelne Blöcke. Die Blöcke sind durch Pfeile verbunden. Die Anschlussseite der Pfeile repräsentiert unterschiedliche Schnittstellen. Abbildung 210 zeigt einen generischen Block und ein Beispiel aus [230]:

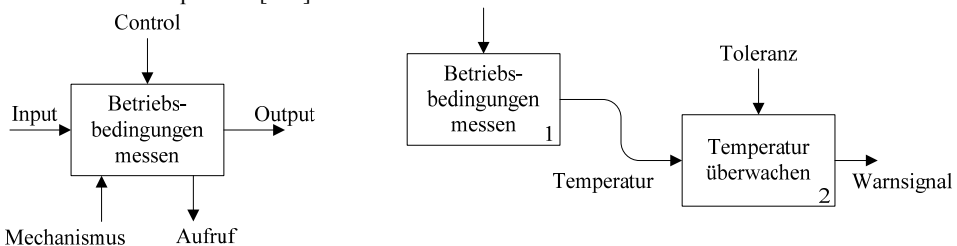


Abbildung 210: Beispiel für IDEF0 Funktionsdiagramm [230]

Neben Ein- und Ausgang wird ein verwendeter Mechanismus (Ressource) und ein resultierender Aufruf gezeigt. Das Control-Element beschreibt eine wirkende Randbedingung. Die Notation ist insgesamt deutlich stärker an Software orientiert. Der hierarchische Aufbau ist ein Vorteil.

- Die **FFBD (Functional Flow Block Diagram)** ist eine ähnliche Notation, die zusätzlich sequenzorientiert ist. Sie zeigt die zeitliche Abfolge von Funktionsaufrufen, nicht jedoch die Durchlaufzeit einer Funktion. Zusätzlich können die Blöcke mit logischen UND/ODER-Blöcken verbunden

werden. Die Diagramme werden ebenfalls hierarchisch aufgebaut. Abbildung 211 zeigt ein Beispiel aus [2]:

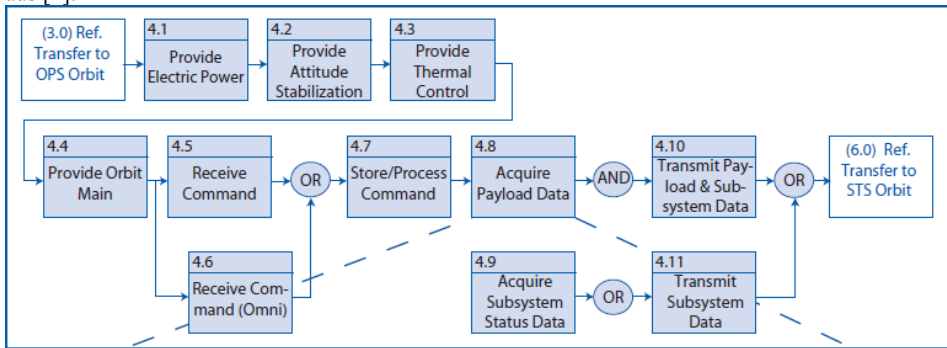


Abbildung 211: Beispiel für ein FFBD [2]

- Die **EMR (Energetic Macroscopic Representation)** ist eine physikalisch orientierte Beschreibungsnotation, die speziell für die Modellierung elektromechanischer Energieketten entwickelt wurde. Mit der EMR können insbesondere Wechselwirkungen zwischen Komponenten der Energiekette beschrieben werden. Dadurch wird die Ableitung von Regelungsstrukturen erleichtert [231]. Abbildung 212 zeigt als Beispiel das Modell einer Antriebskette:

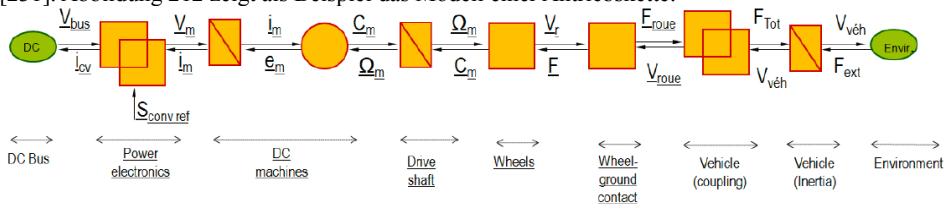


Abbildung 212: Beispiel für ein EMR-Modell einer Antriebskette [142]

Das Modell zeigt als Quelle einen DC-Bus und als Senke die Umwelt. Dazwischen liegen Elemente für Kopplung, Energiespeicherung und Energiewandler. Die Details der Notation können [142] entnommen werden.

- Die **SysML (Systems Modeling Language)** basiert auf der UML (Unified Modeling Language) aus dem Bereich der Softwareentwicklung. Die UML ist ein internationaler Standard und wurde in der SysML um spezielle Elemente der Systementwicklung erweitert [19]. Abbildung 213 zeigt die Einordnung der unterschiedlichen Modelle dieser Beschreibungssprache:

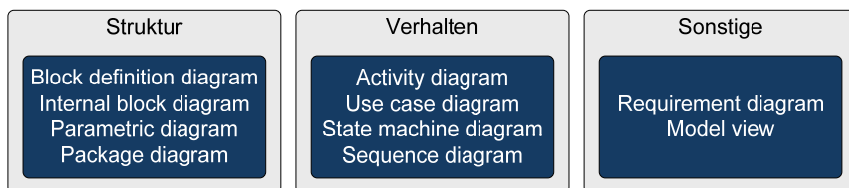
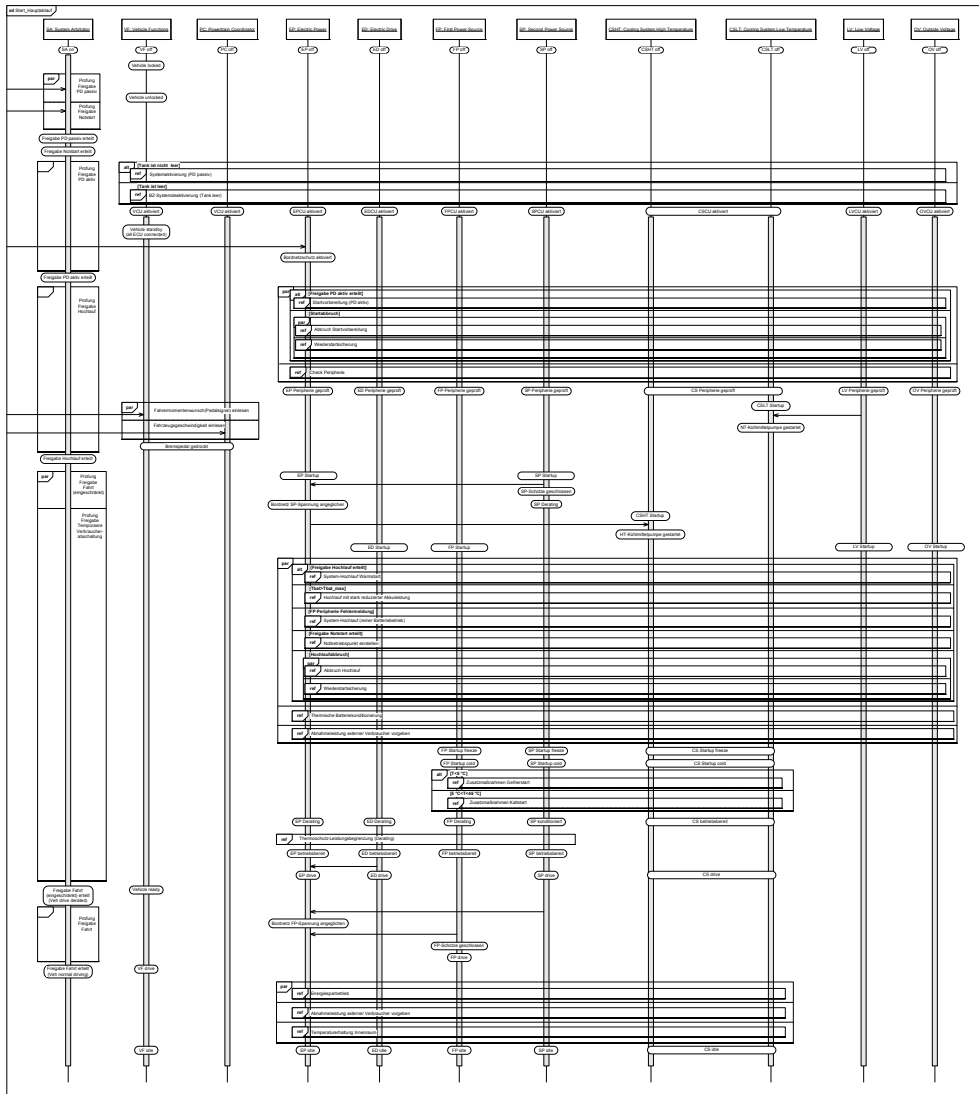
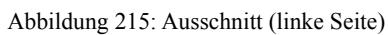


Abbildung 213: Modelltypen der SysML [19]

Für einen Einsatz von SysML zur Modellierung des Antriebsstrangs spricht die Tatsache, dass hier ein internationaler Standard verwendet wird. Darüber hinaus ist die Eignung zur Modellierung von Hardware- und Softwareanteilen gegeben. Außerdem werden lediglich die Modellelemente definiert (feste Semantik). Es gibt aber keine Vorschriften, wie diese kombiniert werden müssen (offene Syntax). Dem Gestalter entstehen dadurch viele Freiheiten.





16.6 Sequenzdiagramm mit State-Identifikation für den Start-Use-Case

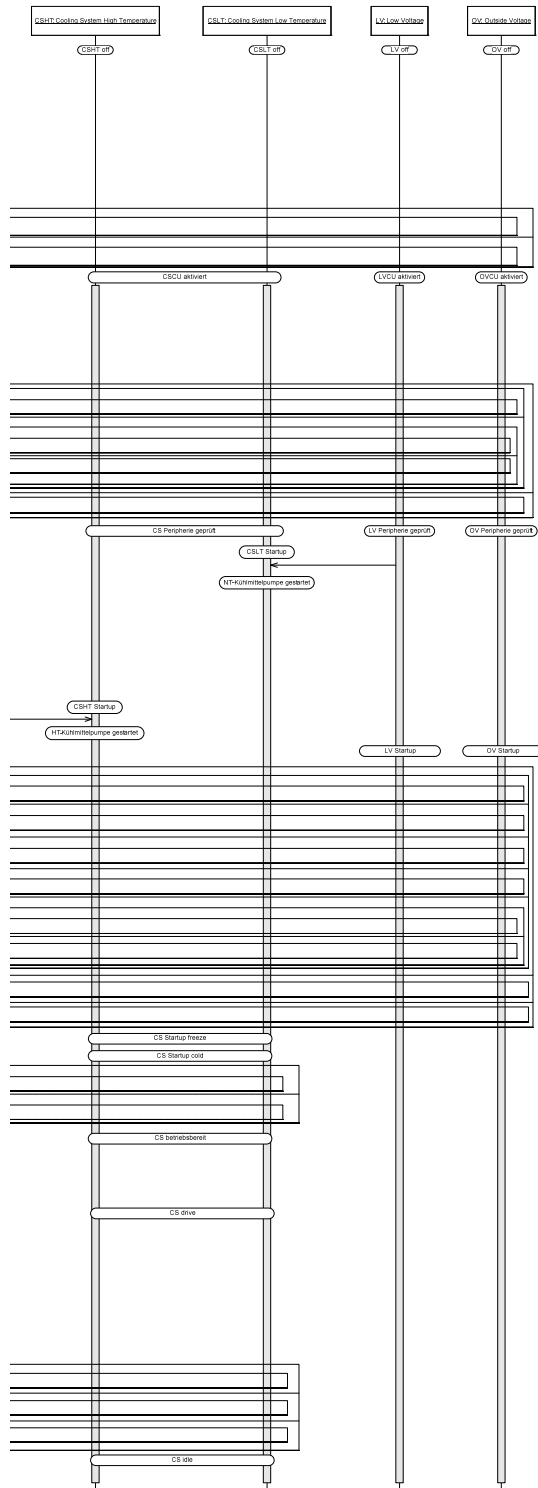


Abbildung 216: Ausschnitt (rechte Seite)

16.7 Ergebnisse der Clusterexperimente

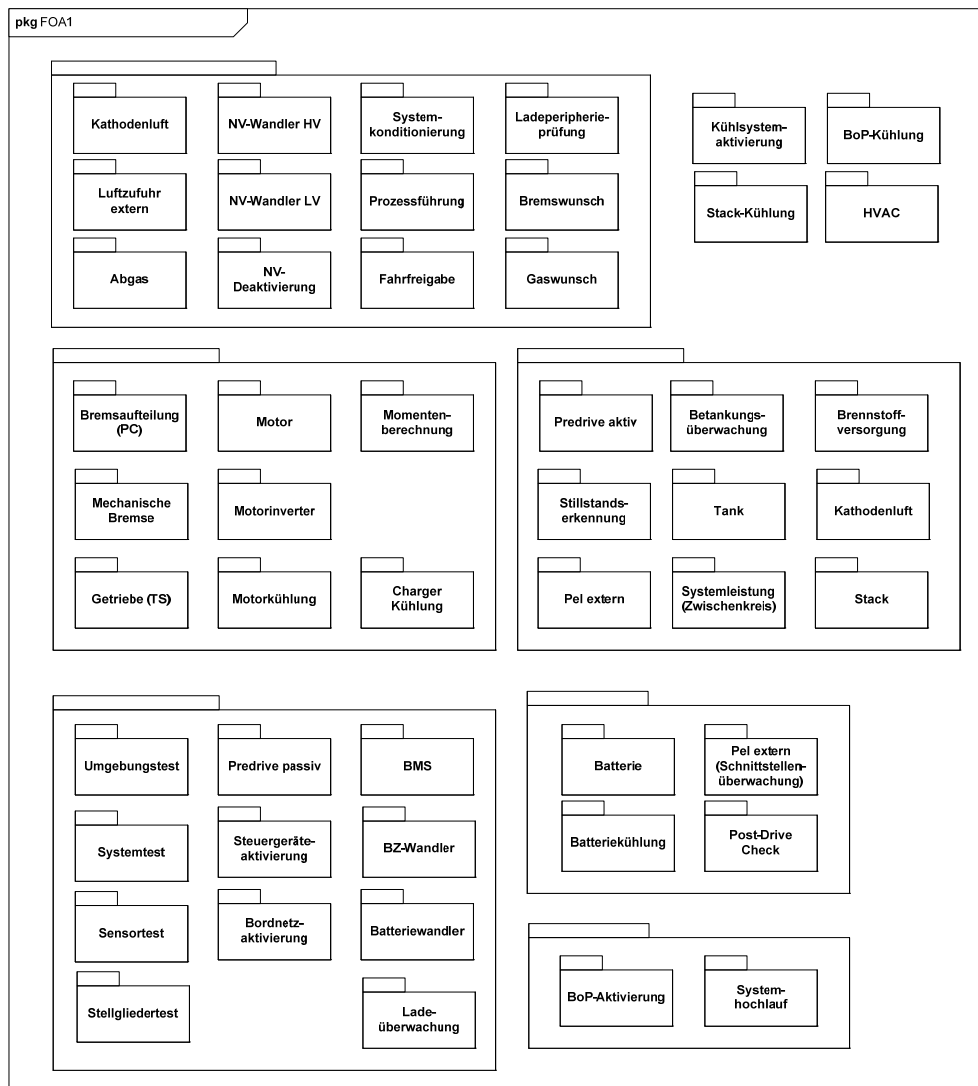


Abbildung 217: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die Clusterung der Kontrollflussmatrix (FOA1)

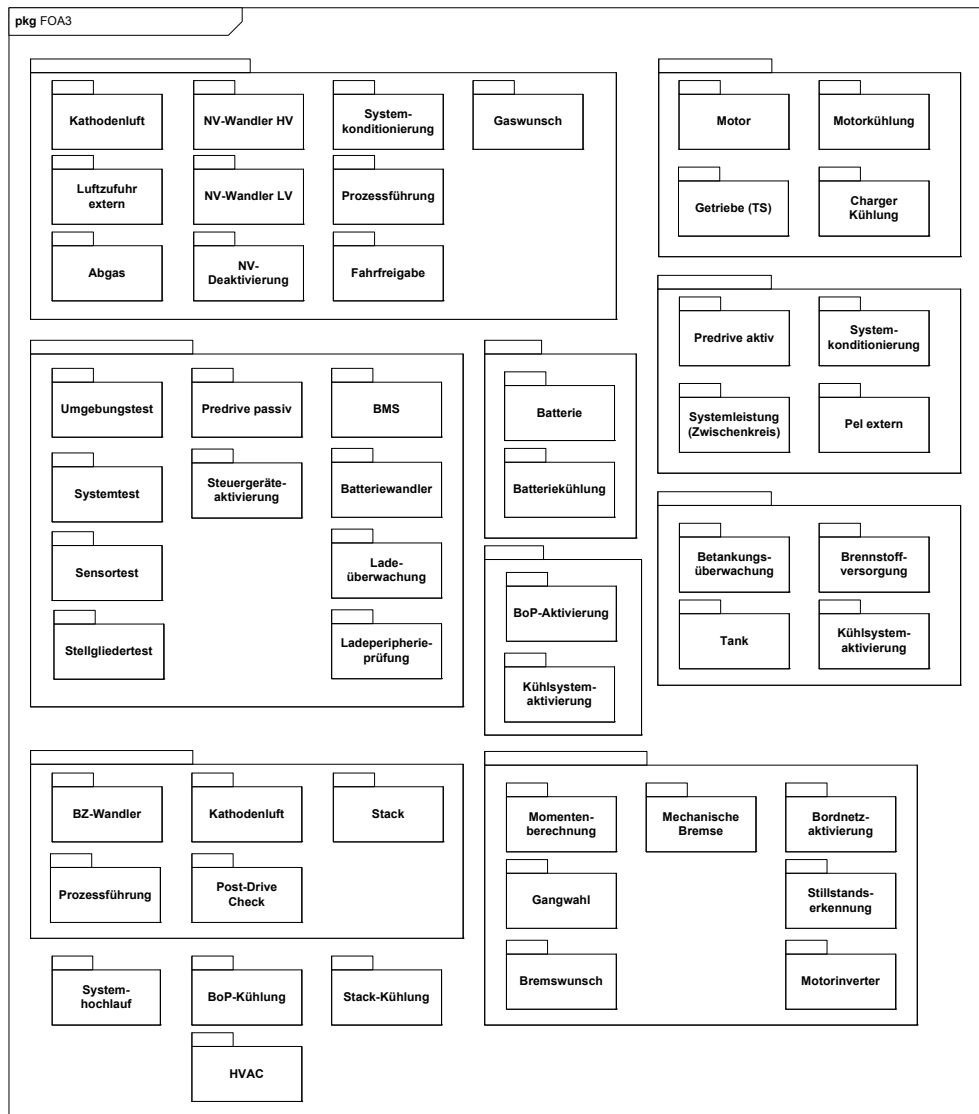


Abbildung 218: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die Clusterung der CON-Matrix (FOA3)

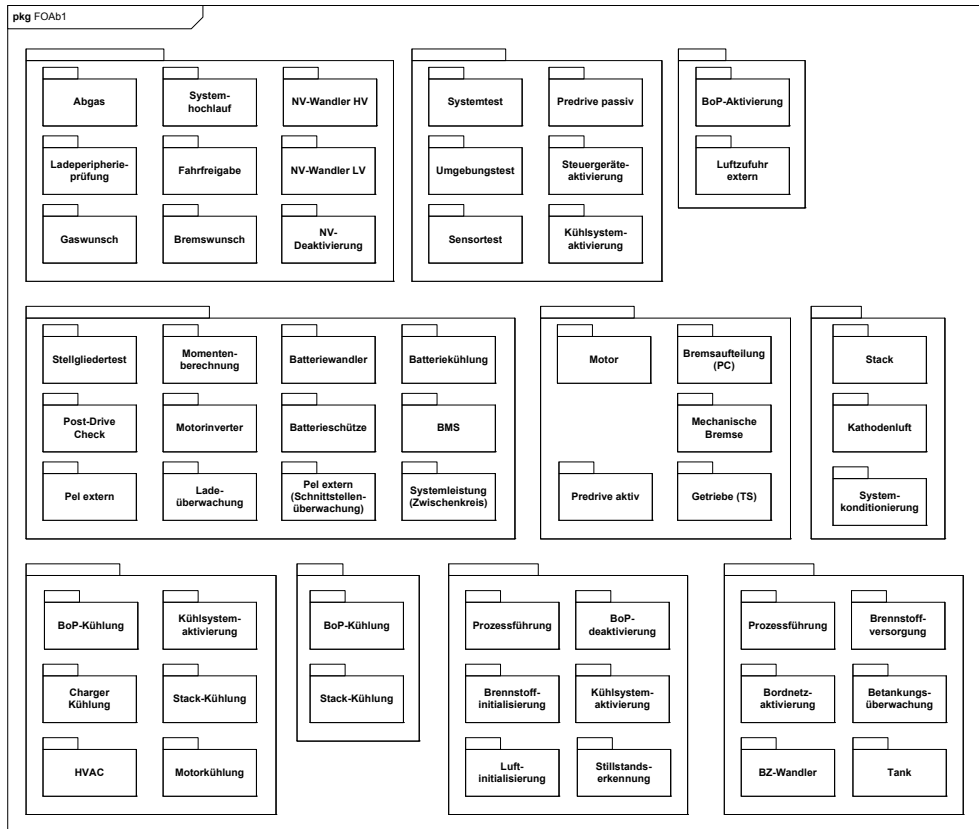


Abbildung 219: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die gewichtete Clusterung der CON-Matrix (FOAb1)

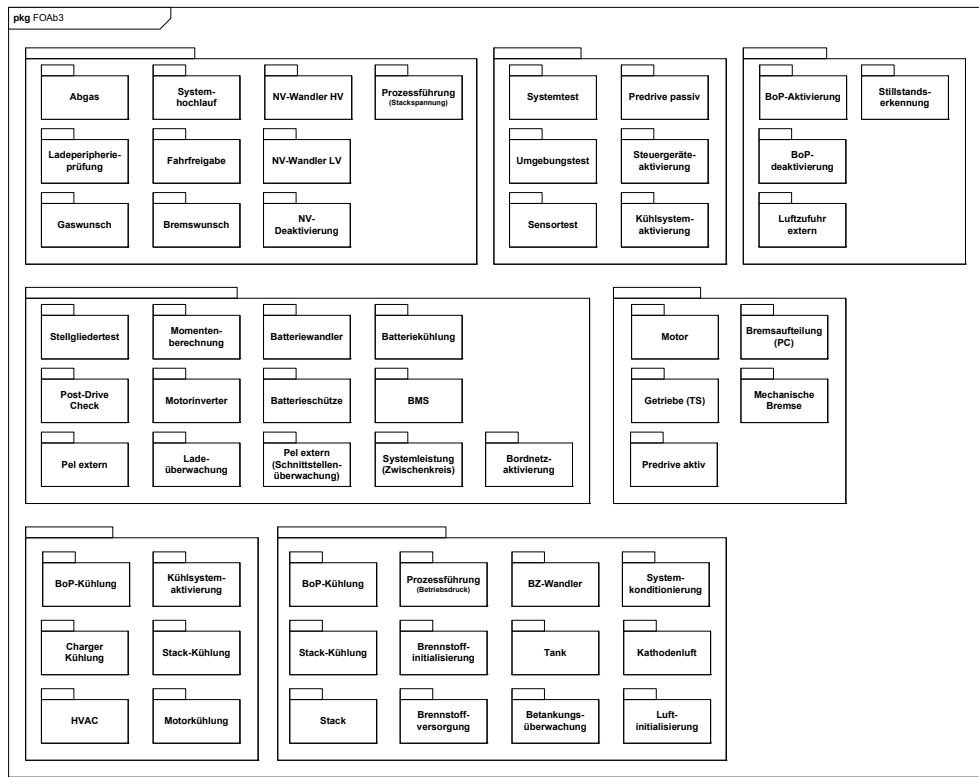


Abbildung 220: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die gewichtete Clusterung der CON-Matrix (FOAb3)

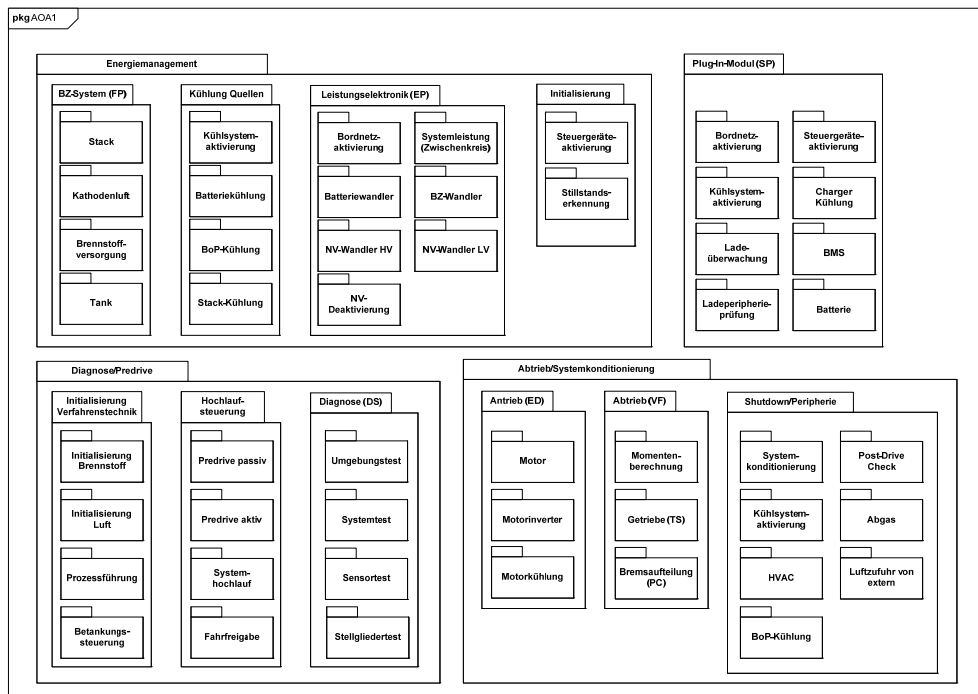


Abbildung 221: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die Clusterung der CONACT-Matrix

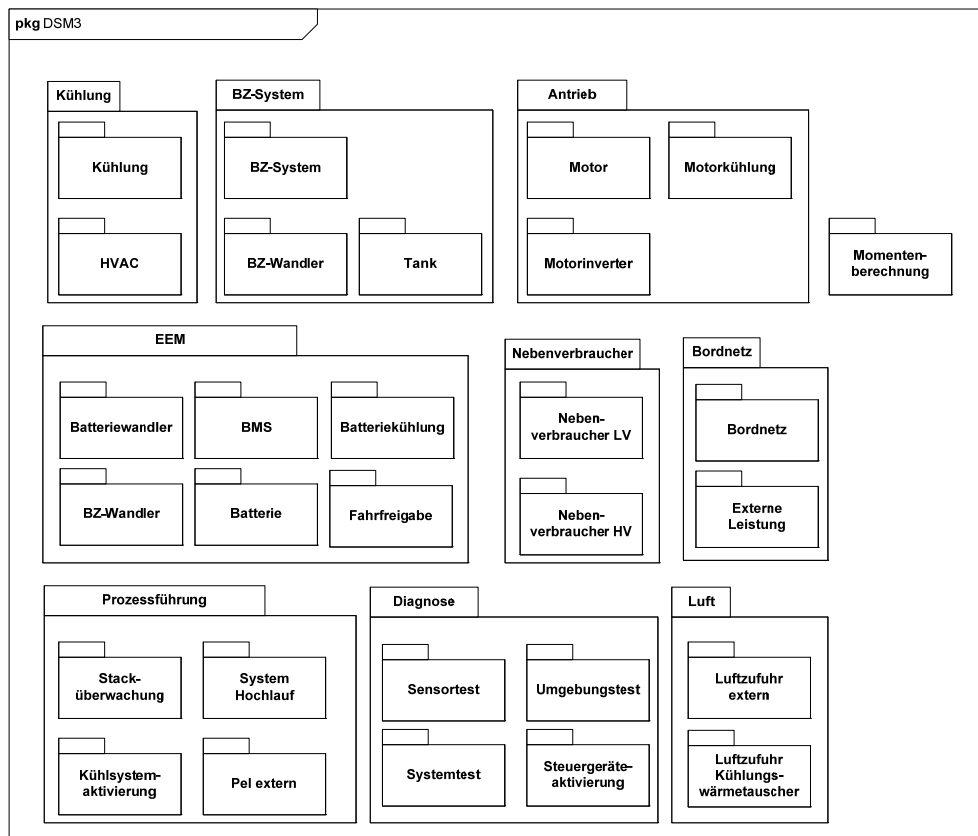


Abbildung 222: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die DSM-Clustering der Kontrollflussmatrix

16.8 Eingangsszenario zur Validierung der Zustandsautomaten

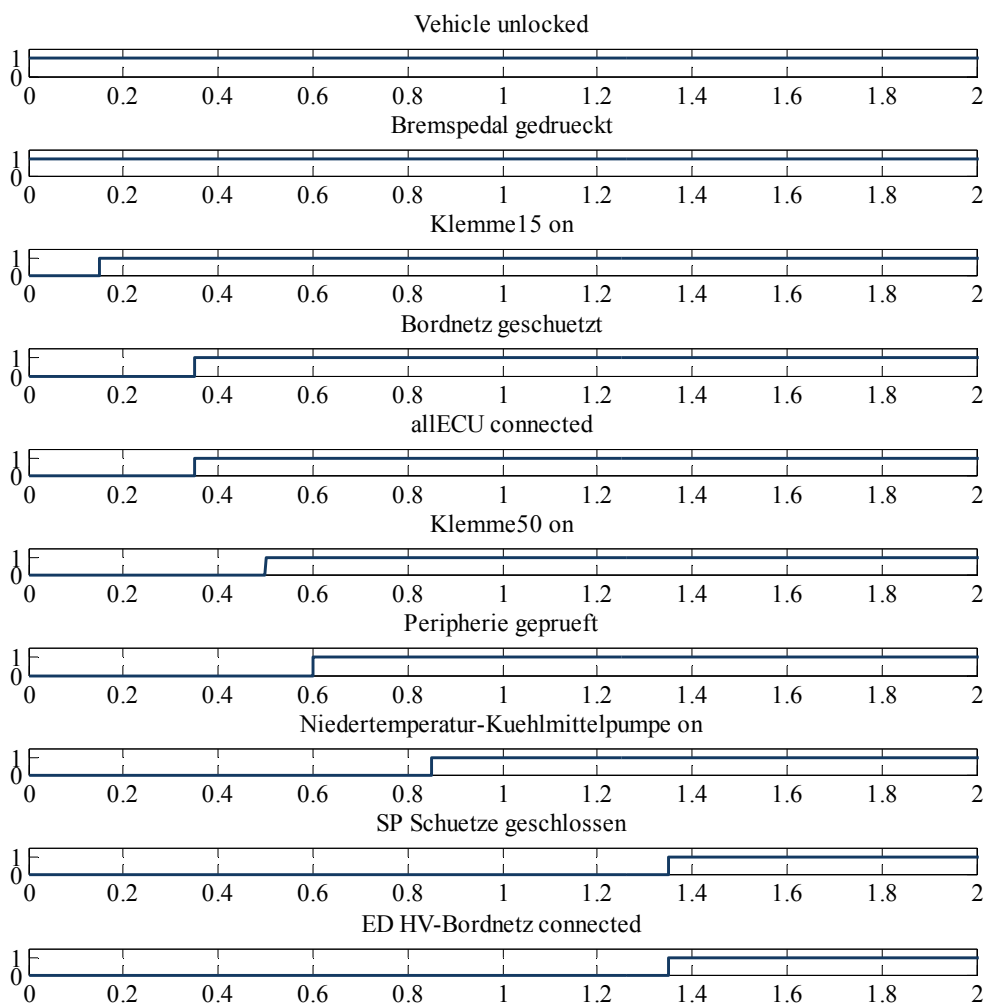


Abbildung 223: Eingangsszenario für die Verhaltenssimulation der Zustandsautomaten

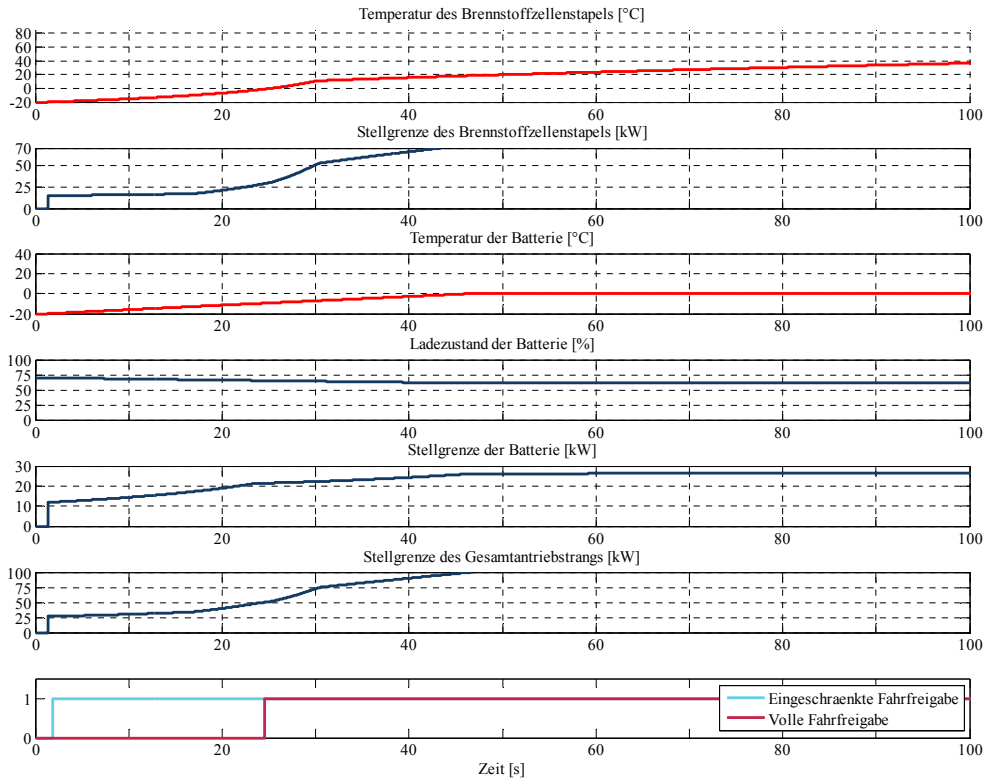


Abbildung 224: Physikalisches Verhalten von Batterie und Brennstoffzelle während der Kaltstart-situation (mit der Annahme 20 erhöhter Verlustleistung der Brennstoffzelle)

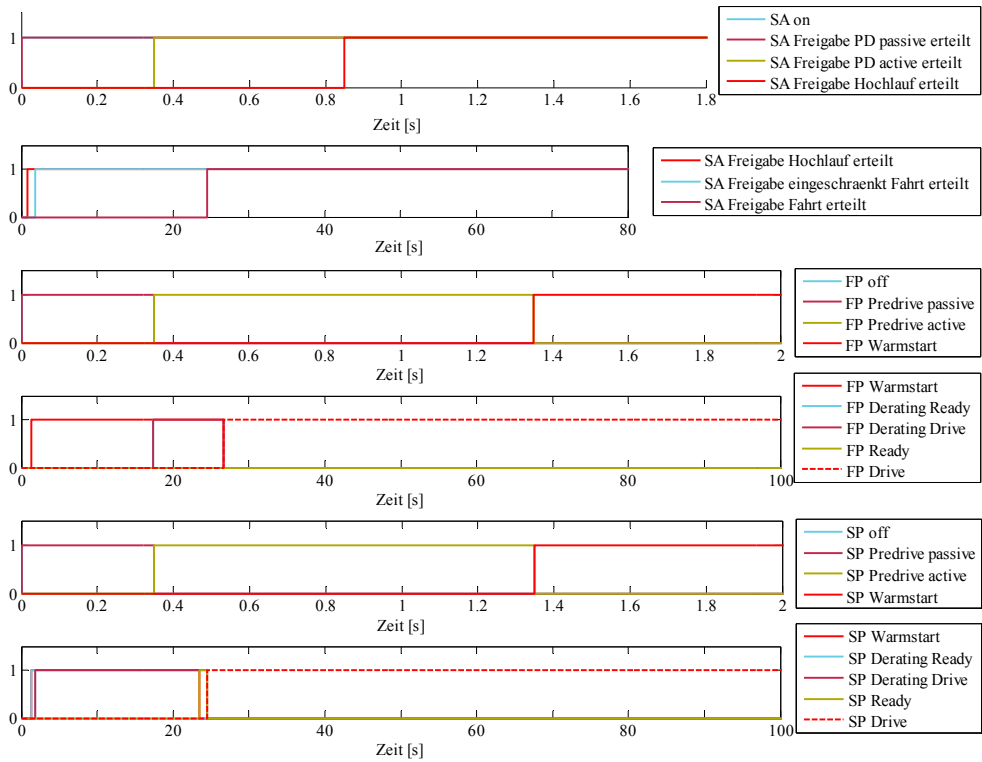


Abbildung 225: Reaktives Verhalten der Zustandsautomaten während der Kaltstartsimulation (mit der Annahme 20 % erhöhter Verlustleistung der Brennstoffzelle)

17 Literatur

- [1] Manfred Broy. Was ist eine Spezifikation? Und wie spezifizieren wir? In *REConf*, München, März 2003
- [2] NASA. *NASA Systems Engineering Handbook*. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., USA, 2007.
- [3] Sebastian Engell, Goran Frehse, and Eckehard Schnieder. Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems. In *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, volume 279. Springer, 2002.
- [4] OMG (Object Management Group), Artikel "What is Systems Engineering?", <http://www.incose.org/practice/whatissystemseng.aspx>, abgerufen 2012
- [5] Jeff A. Estefan. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. Technical report, Jet Propulsion Laboratory California Insitute of Technology, Pasadena, California, USA, 2008.
- [6] Winston W. Royce. Managing the development of large software systems: concepts and techniques. In *Proc. IEEE WESTCON*. IEEE Press, August 1970. Reprinted in *Proc. Int'l Conf. Software Engineering (ICSE) 1989*, ACM Press, pp. 328-338.
- [7] Manfred Broy. Vorlesung Software Engineering (Softwaretechnik). Technical report, TU München, München, 2011.
- [8] B. W. Boehm. A spiral model of software development and enhancement. *Computer*, 21(5):61–72, may 1988.
- [9] John O. Clark. System of Systems Engineering from a SStandard, V-Model, and Dual V-Model Perspective. In *Systems and Software Technology Conference*. INCOSE, IEEE, april 2009.
- [10] Klaus Pohl. *Requirements Engineering*. dpunkt.verlag, Heidelberg, 2008.
- [11] Loyd Baker, Paul Clemente, Bob Cohen, Larry Permenter, Byron Purves, and Pete Salmon. Foundational Concepts for Model Driven System Design. Technical report, INCOSE Model Driven System Design Working Group, San Diego, USA, 1996.
- [12] Elisabeth Hull, Ken Jackson, and Jeremy Dick. *Requirements Engineering*. Springer, London, 2010.
- [13] A. van Lamsweerde. Goal-oriented requirements engineering: a guided tour. In *Requirements Engineering, 2001. Proceedings. Fifth IEEE International Symposium*, pages 249–262, 2001.
- [14] Matthias Kirchmayr, Mark Müller, Birgit Penzenstadler, Ernst Sikora, and Thorsten Weyer. Essenzieller REMsES-Leitfaden. Technical report, REMsES Konsortium, 2008.

-
- [15] Alexei Lapouchnian. Goal-Oriented Requirements Engineering: An Overview of the Current Research. Technical report, Department of Computer Science, University of Toronto, 2005.
 - [16] Jinho Kim and K.J. Rogers. An object-oriented approach for building a flexible supply chain model. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 35(7):481–502, 2005.
 - [17] Emanuel Letier and Axel van Lamsweerde. Reasoning about Partial Goal Satisfaction for Requirements and Design Engineering. Newport Beach, California, USA, 2004. SIGSOFT’04/FSE-12.
 - [18] Alistair Cockburn. *Writing Effective Use Cases*. Addison-Wesley Professional, 1st edition, 2000.
 - [19] Tim Weilkiens. *Systems Engineering with SysML/UML*. Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2008.
 - [20] Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz, Jörg Feldhusen and Karl-Heinrich Grote. *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. Springer, Berlin, 7. Auflage, Oktober 2006.
 - [21] Josef Ponn and Udo Lindemann. *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Springer, Heidelberg, 2011.
 - [22] K.C. Kang, Jaejoon Lee, and P. Donohoe. Feature-oriented product line engineering. *Software, IEEE*, 19(4):58 – 65, jul/aug 2002.
 - [23] Jörg Schäuffele and Thomas Zurawka. *Automotive Software Engineering*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 4th edition, 2010.
 - [24] Jeffrey M. Thompson and Mats P. E. Heimdahl. Structuring product family requirements for n-dimensional and hierarchical product lines. *Requirements Engineering*, 8:42–54, 2003. 10.1007/s00766-003-0166-0.
 - [25] Freek Erens and Karel Verhulst. Architectures for product families. *Computers in Industry*, 33(2–3):165 – 178, 1997. Co-Operation in Manufacturing Systems, CIM at Work.
 - [26] F. Salvador. Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 54(2):219–240, may 2007.
 - [27] J.S. Meehan, A.H.B. Duffy, and R.I. Whitfield. Supporting ‘Design for Re-use’ with Modular Design. *Concurrent Engineering*, 15(2):141–155, 2007.
 - [28] Thomas U. Pimmler and Steven D. Eppinger. Integration analysis of product decompositions. In *ASME Conference on Design Theory and Methodology*. Minneapolis, MN, pages 343–351, 1994.

-
- [29] P. Danese and R. Filippini. Direct and mediated effects of product modularity on development time and product performance. In *Management of Innovation and Technology (ICMIT), 2010 IEEE International Conference on*, pages 438 –443, june 2010.
 - [30] J. H. Mikkola. Management of Product Architecture Modularity for Mass Customization: Modeling and Theoretical Considerations. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 54(1):57 –69, feb. 2007.
 - [31] S.K. Fixson and J.P. Clark. On the link between modularity and cost—a methodology to assess cost implications of product architecture differences. In *Engineering Management Conference, 2002. IEMC '02. 2002 IEEE International*, volume 1, pages 131 – 136 vol.1, 2002.
 - [32] C. da Cunha, B. Agard, and A. Kusiak. Design for Cost: Module-Based Mass Customization. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, 4(3):350 –359, july 2007.
 - [33] Robert Stone, Kristin Wood, and Richard Crawford. A Heuristic Method For Identifying Modules For Product Architectures. Design Studies, 2011.
 - [34] David Wynn. A Computational Method to Support Product Architecture Design. In *Proceedings of IMECE2009*, Lake Buena Vista, Florida, November 2009. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME.
 - [35] P. Gu, M. Hashemian, G.Sosale, and E.Rivin. An Integrated Modular Design Methodology for Life-Cycle Engineering. In *Annals of the CIRP*, volume 46. CIRP, 1997.
 - [36] R.I. Whitfield, J.S. Smith, and A.H.B. Duffy. Identifying component modules. In *7th International Conference on Artificial Intelligence in Design*, 2002.
 - [37] Victor B. Kreng and Tseng-Pin Lee. Modular product design with grouping genetic algorithm—a case study. *Computers & Industrial Engineering*, 46(3):443 – 460, 2004.
 - [38] A. Zakarian. A New Nonbinary Matrix Clustering Algorithm for Development of System Architectures. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 38(1):135 –141, jan. 2008.
 - [39] Thom J. van Beek, Mustafa S. Erden, and Tetsuo Tomiyama. Modular design of mechatronic systems with function modeling. *Mechatronics*, 20(8):850 – 863, 2010. Special Issue on Theories and Methodologies for Mechatronics Design.
 - [40] Ronnie Thebeau. Knowledge Management of System Interfaces and Interactions for Product Development Processes. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 1992.
 - [41] Kees Dorst and Pieter E. Vermaas. John Gero’s Function-Behaviour-Structure model of designing: a critical analysis. *Research in Engineering Design*, 16:17–26, 2005.

-
- [42] Y.-M. Deng and D. Zheng. Behavioural modelling for design decomposition and design equations derivation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29:1105–1114, 2006.
- [43] Dioclecio Camelo, Elena Mulet, and Rosario Vidal. Function and Behavior Representation to Supporting Flexible Exploration and Generation in a Functional Model for Conceptual Design. In *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED07)*, pages 713–714, Paris, 2007.
- [44] P. Kruchten. Casting software design in the function-behavior-structure framework. *Software, IEEE*, 22(2):52 – 58, march-april 2005.
- [45] OMG (Object Management Groupe). OMG Systems Modeling Language. Technical report, Needham, USA, 2010.
- [46] Tim Weilkiens. SYSMOD - Systems Modeling Process, <http://www.sysmod.de>, abgerufen 2012.
- [47] Konrad Reif. *Brennstoffzellen für den Kfz-Antrieb*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009.
- [48] Rupert Stütze, Hans-Peter Gröter, and Jan Lichtermann. Elektrifizierung auf dem Weg zur Großserie. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 01:8–15, 2011.
- [49] Ali Emadi. *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. Taylor&Francis, Boca Raton, USA, 2005.
- [50] Pet al. Corbo. *Hydrogen Fuel Cell for Road Vehicles*. Springer, London, 2011.
- [51] Aberdeen Group. The Mechatronics System Design Benchmark Report. Technical report, Aberdeen Group, 2006.
- [52] Donald G. Reinertsen. *Managing the Design Factory*. Simon & Schuster Inc., 1997.
- [53] Donald G. Reinertsen. *The Principles of Product Development Flow*. Celeritas Publishing, 2009.
- [54] Matthew Hause and Francis Thom. Building Bridges Between Systems and Software with SysML and UML. Technical report, INCOSE, 2008.
- [55] IBM Business Consulting Services. Embedded Systems Overhaul, 12 2004.
- [56] Klaus Pohl and Ernst Sikora. COSMOD-RE: Supporting the Co-Design of Requirements and Architectural Artifacts. In *15th IEEE International Requirements Engineering Conference*, 2007.
- [57] Guy Kawasaki. Artikel: “How to create an enchanting business plan”, <http://blog.guykawasaki.com/2012/01/how-to-create-an-enchanting-business-plan-officeandguyk.html>, abgerufen Januar 2012.
- [58] Sanford Friedenthal, Alan Moore, and Rick Steiner. *A Practical Guide to SysML*. Morgan Kaufmann, Boston, second edition edition, 2012.

-
- [59] Scott W. Ambler. “Examining the Agile Cost of Change Curve”. <http://www.agilemodeling.com/essays/costOfChange.htm>, abgerufen April 2012.
 - [60] IEEE. IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process. Technical report, New York, USA, 1998.
 - [61] ISO/IEC. ISO/IEC 15288 Systems and software engineering - Systems life cycle processes. Technical report, Genf, Schweiz, 2008.
 - [62] Phillip A. Laplante and Colin J. Neill. The Demise of the Waterfall Model Is Imminent. *Queue*, 1(10):10–15, February 2004.
 - [63] Omar Naas. Hot & Spicy - Erfahrungen mit agilerem Requirements Engineering im Automotive Umfeld. In *ReConf 2010*, München, März 2010.
 - [64] Linda Macaulay. Requirements for requirements engineering techniques. In *Requirements Engineering, 1996, Proceedings of the Second International Conference on*, pages 157 –164, april 1996.
 - [65] Lan Cao and B. Ramesh. Agile Requirements Engineering Practices: An Empirical Study. *Software, IEEE*, 25(1):60 –67, jan.-feb. 2008.
 - [66] Chris Rupp. *Requirements-Engineering und -Management*. Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, 5th edition, Juli 2009.
 - [67] Mahmood Niazi, Karl Cox, and June Verner. A measurement framework for assessing the maturity of requirements engineering process. *Software Quality Journal*, 16:213–235, 2008. 10.1007/s11219-007-9033-4.
 - [68] K. El Emam and N.H. Madhavji. Measuring the success of requirements engineering processes. In *Requirements Engineering, 1995., Proceedings of the Second IEEE International Symposium on*, pages 204 – 211, mar 1995.
 - [69] S. Misra, V. Kumar, and U. Kumar. Goal-oriented or scenario-based requirements engineering technique - what should a practitioner select? In *Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conference on*, pages 2288 –2292, may 2005.
 - [70] I. Menzel, M. Mueller, A. Gross, and J. Doerr. An Experimental Comparison Regarding the Completeness of Functional Requirements Specifications. In *Requirements Engineering Conference (RE), 2010 18th IEEE International*, pages 15 –24, 27 2010-oct. 1 2010.
 - [71] J.G. Hall, M. Jackson, R.C. Laney, B. Nuseibeh, and L. Rapanotti. Relating software requirements and architectures using problem frames. In *Requirements Engineering, 2002. Proceedings. IEEE Joint International Conference on*, pages 137 – 144, 2002.
 - [72] Peter Denning and Pamela Dargan. Bringing design to software. chapter Action-centered design, pages 105–127. ACM, New York, NY, USA, 1996.

-
- [73] Venkat Alladi, John Wei, and Subra Ganesan. Writing Better Real-Time System Requirements with Use Cases and Services. *SAE Technical Paper*, 01(1315):81–84, 2005.
- [74] B. Regnell, M. Andersson, and J. Bergstrand. A hierarchical use case model with graphical representation. In *Engineering of Computer-Based Systems, 1996. Proceedings., IEEE Symposium and Workshop on*, pages 270–277, mar 1996.
- [75] Bill Hasling, Helmut Goetz, and Klaus Beetz. Model Based Testing of System Requirements using UML Use Case Models. In *Software Testing, Verification, and Validation, 2008 1st International Conference on*, pages 367–376, april 2008.
- [76] Colette Rolland, Carine Souveyet, and Camille Ben Achour. Guiding Goal Modeling Using Scenarios. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 24(12):1055–1071, Dezember 1998.
- [77] K. Kang, S. Cohen, J. Hess, W. Novak, and S. Peterson. Feature-Oriented Domain Analysis (FODA) Feasibility Study. Technical Report CMU/SEI-90-TR-21, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 1990.
- [78] Alistair Cockburn. Structuring Use Cases with Goals. *Journal of Object-Oriented Programming*, Sept-Oct and Nov-Dec, 1997.
- [79] K. Uno, S. Hayashi, and M. Saeki. Constructing Feature Models Using Goal-Oriented Analysis. In *9th International Conference on Quality Software. QSIC '09.*, pages 412–417, August 2009.
- [80] Sooyong Park, Minseong Kim, and Vijayan Sugumaran. A scenario, goal and feature-oriented domain analysis approach for developing software product lines. *Industrial Management & Data Systems*, 104(4):296–308, 2004.
- [81] Hermann Kaindl. A Design Process Based on a Model Combining Scenarios with Goals and Functions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 30(5):537–551, 2000.
- [82] Andrey Ricardo Pimentel and Paulo César Stadzisz. A Use Case Based Object-Oriented Software Design Approach Using the Axiomatic Design Theory. In *Proceedings of ICAD2006 4th International Conference on Axiomatic Design*, Firenze, Juni 2006.
- [83] Karl Cox and Keith Phalp. Comparing Use Case Writing Guidelines. In *7 th Int. Workshop on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality*, pages 101–112, 2001.
- [84] S. Lilly. Use case pitfalls: top 10 problems from real projects using use cases. In *Technology of Object-Oriented Languages and Systems, 1999. TOOLS 30. Proceedings*, pages 174–183, aug 1999.
- [85] S. Islam and H. Omasreiter. Systematic use case interviews for specification of automotive systems. In *Software Engineering Conference, 2005. APSEC '05. 12th Asia-Pacific*, page 8 pp., Dec. 2005.

-
- [86] E. Nasr, J. McDermid, and G. Bernat. A technique for managing complexity of use cases for large complex embedded systems. In *Object-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2002. (ISORC 2002). Proceedings. Fifth IEEE International Symposium on*, pages 225–232, 2002.
 - [87] F. Moisiadis. Prioritising scenario evolution. In *Requirements Engineering, 2000. Proceedings. 4th International Conference on*, pages 85–94, 2000.
 - [88] Wikipedia. Mercedes-Benz T 245. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mercedes-Benz_T_245&diff=99427407&oldid=99427393, abgerufen am 25.04.2012.
 - [89] Leding Du and Mitchell M. Tseng. Design of Micro Direct Methanol Fuel Cell by Axiomatic Design. In *Proceedings of ICAD2006 4th International Conference on Axiomatic Design*, June 2006.
 - [90] Tony Markel, Matthew Zolot, Keith B. Wipke, and Ahmad A. Pesaran. Energy Storage System Requirements for Hybrid Fuel Cell Vehicles. In *Advanced Automotive Battery Conference*, 2002.
 - [91] Keith Wipke, Prashant Chintawar, Rick Weller, and Gordon Willis. An Engineering System for Automated Design and Optimization of Fuel Cell Powered Vehicles. *ASME Conference Proceedings*, 2003(36681):449–454, 2003.
 - [92] Henning Wallentowitz. Längsdynamik von Kraftfahrzeugen. Vorlesungsmanuskript Institut für Kraftfahrzeuge Aachen (ika), RWTH Aachen University, 2003.
 - [93] Martin Koppers. Modellierung und Simulation von Brennstoffzellenfahrzeugkonzepten. Master’s thesis, Universität Duisburg-Essen, 2010.
 - [94] J.C. Wilhelm. *Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems*. Schriften des Forschungszentrums Jülich. Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 2010.
 - [95] Diego Feroldi. *PEM Fuel Cells with Bio-Ethanol Processor Systems*. Springer London, 2012.
 - [96] Rajesh K. Ahluwalia, X. Wang, and A. Rousseau. Fuel economy of hybrid fuel-cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 152(0):233–244, 2005.
 - [97] Harald Neudorfer, Andreas Binder, and Nicolas Wicker. Analyse von unterschiedlichen Fahrzyklen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 123(7-8):352–360, 2006.
 - [98] Nils Kaiser, Rodrigo Biurrun, Helerson Kemmer, Patrick König, Frank Meier, and Dirk Vollmer. Bewertung FCHV-Varianten bezüglich Funktion und Kosten. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2011.

- [99] E.J. Carlson, P. Kopf, S. Sinha, S. Sriramulu, and Y. Yang. Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation. Technical report, National Renewable Energy Laboratory, Dezember 2005.
- [100] Michael O’Keefe, Aaron Brooker, Caley Johnson, Mike Mendelsohn, Jeremy Neubauer, and Ahmad Pesaran. Battery Ownership Model: A Tool for Evaluating the Economics of Electrified Vehicles and Related Infrastructure. In *25th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition*. National Renewable Energy Laboratory, November 2010.
- [101] Holger Fink. Battery Technology. In *IAA 2010 Symposium*. Verband der Automobilindustrie, 2010.
- [102] Rob Bracewell, Ken Wallace, Michael Moss, and David Knott. Capturing design rationale. *Computer-Aided Design*, 41(3):173 – 186, 2009. Computer Support for Conceptual Design.
- [103] Antony Tang, Muhammad Ali Babar, Ian Gorton, and Jun Han. A survey of architecture design rationale. *Journal of Systems and Software*, 79(12):1792 – 1804, 2006.
- [104] Broy, Diernhofer, Grünbauer, Meisinger, Rappl, Rittmann, Schätz, Schoenmakers, and Spanfeller. Service-Oriented Development. Whitepaper, Software & Systems Engineering, Technische Universität München, 2006.
- [105] Thomas Erl. SOA Principles: An Introduction to the Service-Oriented Paradigm. <http://www.soapprinciples.com/default.php>, abgerufen März 2012.
- [106] M. Lehmann. Entwicklungsmethodik für die Anwendung der Mikroelektronik im Maschinenbau. *Konstruktion*, 37:339–342, 1985.
- [107] Konrad Reif, editor. *Motronic-Systeme*. Vieweg + Teubner, 2009.
- [108] Robert Bosch GmbH, editor. *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Vieweg + Teubner, 27th edition, 2011.
- [109] Konrad Reif. *Hybridantriebe - Antriebsstrukturen und Betrieb*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009.
- [110] M. E. Sosa, A. Agrawal, S. D. Eppinger, and C. M. Rowles. A network approach to define modularity of product components. In *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - DETC2005*, volume 5, pages 435–446, 2005.
- [111] Edward Crawley, Olivier De Weck, Christopher Magee, Joel Moses, Warren Seering, Joel Schindall, David Wallace, and Daniel Whitney. The influence of architecture in engineering systems (monograph). MIT Engineering Systems Monograph, März 2004.
- [112] Nils Kaiser. Regelungsstruktur Brennstoffzellenhybridfahrzeug. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2010.

- [113] V. Balakrishnan. *Schaum's Outline of Graph Theory*. McGraw-Hill Professional, 1997.
- [114] A. Barrat, M. Barthélemy, R. Pastor-Satorras, and A. Vespignani. The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(11):3747–3752, 2004.
- [115] Phillip Bonacich. Some unique properties of eigenvector centrality. *Social Networks*, 29(4):555 – 564, 2007.
- [116] Ronnie Thebeau. DSM Tools, <http://www.dsmweb.org/>, abgerufen 2012.
- [117] Peter J. Rousseeuw. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20(0):53 – 65, 1987.
- [118] Frank Meier. Bewertung HyS-Systemvarianten FCHV. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2010.
- [119] Helerson Kemmer. Variantenrahmen von Luftfördermaschinen für BZ-Antriebssysteme. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2011.
- [120] Dirk Vollmer. Thermalsystemkonzepte für hybridisierte Brennstoffzellenfahrzeuge. Technical report, Robert Bosch GmbH, August 2010.
- [121] Oliver Berger. *Thermodynamische Analyse eines Brennstoffzellensystems von Kraftfahrzeugen*. Universität Duisburg-Essen, 2009.
- [122] A. Saltelli, K. Chan, and E.M. Scott. *Sensitivity Analysis*. Number no. 2008 in Wiley series in probability and statistics. Wiley, 2009.
- [123] J. Bach. Good enough quality: beyond the buzzword. *Computer*, 30(8):96–98, 1997.
- [124] E. Yourdon. When good enough software is best. *Software, IEEE*, 12(3):79–81, 1995.
- [125] A. Kossiakoff, W.N. Sweet, S. Seymour, and S.M. Biemer. *Systems Engineering Principles and Practice*. Wiley Series in Systems Engineering and Management. Wiley, 2011.
- [126] C.M.Creveling, J.L.Slutsky, and Jr. D.Antis. *Design for Six Sigma*. Prentice Hall PTR, 2003.
- [127] Ryan S. Hutcheson, Joseph A. Donndelinger, Daniel A. McAdams, and Robert B. Stone. Applying Functional Modeling as a Unifying Basis for Design for Six Sigma Execution. *ASME Conference Proceedings*, 2004(47055):979–990, 2004.
- [128] Andrea Saltelli, Stefano Tarantola, and Francesca Campolongo. *Sensitivity Analysis in Practice*. Wiley-Interscience, 2004.
- [129] W.K. Hoehn. Robust designs through design to six sigma manufacturability. In *Engineering Management Conference, 1995. 'Global Engineering Management: Emerging Trends in the Asia Pacific'*, *Proceedings of 1995 IEEE Annual International*, pages 241 –246, jun 1995.

-
- [130] Wilhelm Kleppmann. *Taschenbuch Versuchsplanung*. Carl Hanser Verlag München Wien, 6. überarbeitete Auflage, 2009.
- [131] Achim Kolmer. Robust Design - Robustheitsmaße. In *Seminar über Numerische Simulation*. Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI, November 2008.
- [132] L.A.Dobrazanski, J.Domagala, and J.F.Silva. Application of Taguchi method in the optimisation of filament winding of thermoplastic composites. *Archives of Materials Science and Engineering*, 28(3):133–140, März 2007.
- [133] Stephanie Fraley, Mike Oom, Ben Terrien, and John Zalewski. Design of experiments via taguchi methods: orthogonal arrays. The Michigan Chemical Process Dynamics and Controls Open Text Book, November 2007.
- [134] Deutscher Wetterdienst DWD. Klimadaten - Grundversorgung des Deutschen Wetterdienstes, <http://www.dwd.de>, 2007.
- [135] James Larminie and Andrew Dicks. *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 2003.
- [136] Detlef Stolten. *Skriptum zur Vorlesung Grundlagen der Brennstoffzellen*. RWTH Aachen University, Aachen, 2005.
- [137] Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, and Huei Peng. *Control of Fuel Cell Power Systems*. Springer-Verlag, 2005.
- [138] Ulrich Gottwick, Reiner Kimmich, Martin Kropp, and Gunter Wiedemann. Suitable balance-of-plant-components - a key to success of Fuel Cell Vehicles. In *Proceedings of WHEC 2010 (World Hydrogen Energy Conference)*, Essen, Mai 2010.
- [139] Markku Ohenoja and Kauko Leiviskä. Parametric Study of the Hydrogen Fuel Cell Electrochemical Model. In *Proceedings of the EnePro conference*, pages 28–31, Oulu, June 2009. University of Oulu, Finland, Kalevaprint.
- [140] G. Napoli, M. Ferraro, G. Brunaccini, G. Dispenza, and V. Antonucci. Data Driven Model for a Fuel Cell stack development in a complex Multi-source Hybrid Renewable Energy System. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*. European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ), 2010.
- [141] L. Boulon, K. Agbossou, D. Hissel, A. Bouscayrol, P. Sicard, A. Hernandez, and M-C. Péra. Macroscopic modeling and representation of a PEM fuel cell gas supply taking into account the water phenomena. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, pages 1 – 6, sept. 2010.

-
- [142] J. Solano-Martínez, L. Boulon, D. Hissel, M-C. Péra, and M. Amiet. Energetic Macroscopic Representation of a Multiple Architecture Heavy Duty Hybrid Vehicle. pages 1322–1329, Michigan, 2009. Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE.
 - [143] Ulrich Sauter. Modellierung und Parametrierung des Subzero Verhaltens eines Ballard Mk9. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2009.
 - [144] M. Meiler, O. Schmid, M. Schudy, and E.P. Hofer. Dynamic fuel cell stack model for real-time simulation based on system identification. *Journal of Power Sources*, 176(2):523 – 528, 2008.
 - [145] Offices of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). *Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan*, chapter Technical Plan - Fuel Cells, pages 3.4–1 – 3.4.41. U.S. Department of Energy, 2011.
 - [146] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. *Journal of The Electrochemical Society*, 138(8):2334–2342, 1991.
 - [147] Ballard Power Systems Inc., 9000 Glenlyon Parkway Burnaby, BC Canada V5J 5J8. *MK1100 S2.1 Fuel Cell Module User's Manual*, man5100205 edition, November 2007.
 - [148] Scott Blanchet. SPIRE: Sustained Power Intensity with Reduced Electrocatalyst. In *2010 DOE Hydrogen Program Annual Merit Review*, June 2010.
 - [149] Nuvera Fuel Cells. *Specification, 64 Cell Orion Stack*, Technical Report, März 2011.
 - [150] S. Gelfi, A.G. Stefanopoulou, J.T. Pukrushpan, and Huei Peng. Dynamics of low-pressure and high-pressure fuel cell air supply systems. In *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003*, volume 3, pages 2049 – 2054 vol.3, june 2003.
 - [151] Mark Hellmann. Variantenanalyse des Luftsystems von Brennstoffzellen. Technical report, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 2010.
 - [152] Carsten Schönfelder. *Optimierung von Luftversorgungseinheiten für Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugantrieben*. Aachen, 2007.
 - [153] Klaus Lucas. *Thermodynamik. Die Gesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*. Springer-Verlag, 2001.
 - [154] W. Roedel and T. Wagner. *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer, 2011.
 - [155] Michael Knauff, Jeffrey McLaughlin, and Chris Dafis. Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power System Testbed. *Test*, pages 1–8, 2007.
 - [156] Anne Bendzulla. *Von der Komponente zum Stack: Entwicklung und Auslegung von HT-PEFC-Stacks der 5 kW-Klasse*. PhD thesis, RWTH Aachen University, 2010.
 - [157] Dirk Vollmer. Maximal darstellbare Dauerkühlleistung im FCHV. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2009.

-
- [158] Wolf-Heinrich Hucho. *Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*. Vieweg, 2005.
- [159] M. Reichler. *Theoretische Untersuchungen zur Kühlleistungssteigerung durch innovative Kühlsysteme für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*. 2009.
- [160] Diego Feroldi, Maria Serra, and Jordi Riera. Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles. *Journal of Power Sources*, 190(2):387 – 401, 2009.
- [161] P. Corbo, F.E. Corcione, F. Migliardini, and O. Veneri. Energy management in fuel cell power trains. *Energy Conversion and Management*, 47(18–19):3255 – 3271, 2006.
- [162] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, and L. Guzzella. Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle. *Control Engineering Practice*, 13(1):41 – 53, 2005.
- [163] B.L. Bowerman, R.T. O’Connell, and J.B. Orris. *Business statistics in practice*. Operations and Decision Sciences Series. McGraw-Hill/Irwin, 2002.
- [164] Emir Serdarevic. Determining the practical limit for boost factor in DC-DC voltage conversion. *ECN: Electronic Component News*, 55:26, 2011.
- [165] Rik W. de Doncker, Maurice Kowal, and Matthias Biskoping. Standardisierung von HV-Bordnetzen aus Sicht der Leistungselektronik. *ATZ elektronik*, 2:90–95, 2012.
- [166] Brian D. James, Jeffrey A. Kalinoski, and Kevin N. Baum. Mass Production Cost Estimation for Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Automotive Applications. Technical report, Directed Technologies, 2010.
- [167] Hans-Georg Horst. Simulative Abschätzung von Lastprofilen für einen FCHV-Antriebsstrang. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2011.
- [168] Frank Meier and Nils Kaiser. Type IV Tank Cost Assessment. Internal report, Robert Bosch GmbH, 2011.
- [169] Jinfeng Wu, Xiao Zi Yuan, Jonathan J. Martin, Haijiang Wang, Jiujun Zhang, Jun Shen, Shaohong Wu, and Walter Merida. A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Power Sources*, 184(1):104 – 119, 2008.
- [170] R.S. Gemmen and C.D. Johnson. Evaluation of fuel cell system efficiency and degradation at development and during commercialization. *Journal of Power Sources*, 159:646 – 655, 2006.
- [171] Narasimha Bolloju and Sherry Xiaoyun Sun. Exploiting the Complementary Relationship between Use Case Models and Activity Diagrams for Developing Quality Requirements Specifications. In *ER Workshops*, volume 5232 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 144–153. Springer, 2008.

- [172] TOPCASED: The Open-Source Toolkit for Critical Systems, <http://www.topcased.org/>, abgerufen, 2012.
- [173] Donald E. Knuth. *The Art of Computer Programming: Fundamental algorithms*. The Art of Computer Programming. Addison-Wesley, 1968.
- [174] Technical University in Prague. TORSCHE Scheduling Toolbox for Matlab, <http://rttime.felk.cvut.cz/scheduling-toolbox/>, abgerufen 2012.
- [175] Ahmad Pesaran, Gi-Heon Kim, and Jeff Gonder. PEM Fuel Cell Freeze and Rapid Startup. Technical report, National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [176] Nils Kaiser. Startup- und Shutdown-Zeiten aktuell und zukünftig am Prüfstand sowie im Fahrzeug. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2011.
- [177] Zhenhua Jiang and R.A. Dougal. A Compact Digitally Controlled Fuel Cell/Battery Hybrid Power Source. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53(4):1094–1104, 2006.
- [178] AUTOSAR GbR. Specification of ECU State Manager V1.0.0. Technical report, AUTOSAR, 2011.
- [179] P. Adomeit and S. Pischinger. White Paper on a Gasoline Powered PEMFC APU System Control Strategy, <http://www.fev.com/resource-center/publications/gasoline-systems>, abgerufen 2012
- [180] Behle, Herrmann, and Mayer-John. SCODE Guidelines V1.0. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2010.
- [181] Torben Materna. 25 kg pure Energie. *dSPACE Magazin*, 2:6–11, Februar 2009.
- [182] F. Lindlar and A. Zimmermann. A code generation tool for embedded automotive systems based on finite state machines. In *Industrial Informatics, 2008. INDIN 2008. 6th IEEE International Conference on*, pages 1539–1544, 2008.
- [183] Hongbin Li and Dong Li. A simulating model of automotive power system based on the finite state machine. In *Automation and Logistics, 2009. ICAL '09. IEEE International Conference on*, pages 1572–1576, 2009.
- [184] Dirk Vollmer. Betrachtung zu Nutzen, Dimensionierung und Betrieb eines Start-Up Heaters im Kfz-Brennstoffzellensystem. Technical report, Robert Bosch GmbH, 2009.
- [185] Ahmad Pesaran, Andreas Vlahinos, and Thomas Stuart. Cooling and Preheating of Batteries in Hybrid Electric Vehicles. In *6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, 2003.
- [186] VDI. VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Technical report, Düsseldorf, 2004.
- [187] Hans-Peter Hoffman. *Systems Engineering Best Practices with the Rational Solution for Systems and Software Engineering*. IBM Software Group, Somers, NY, USA, 2011.

-
- [188] Mark Kordon, Steve Wall, Henry Stone, William Blume, Joseph Skipper, and Mitch Ingham. Model-Based Engineering Design Pilots at JPL. Technical report, Pasadena, USA, 2007.
- [189] Andreas Bauer, Ulrich Freund, N ria Mata, Jan Philipps, Jan Romberg, Bernhard Sch tz, and Oscar Slotosch. AutoMoDe Automotive Model Based Development. Technical report, TU München and ETAS GmbH and Validas AG, 2006.
- [190] Shinji Yamamoto, Seiho Sugawara, and Kazuhiko Shinohara. *Fuel Cell Stack Durability for Vehicle Application*, pages 467–482. Springer Science+Business Media, 2009.
- [191] Jan Hendrik Ohs, Ulrich Sauter, Sebastian Maass, and Detlef Stolten. Modeling hydrogen starvation conditions in proton-exchange membrane fuel cells. pages 255–263, 2011.
- [192] Norbert Adolph Lange. *Handbook of Chemistry*. McGraw-Hill, 10 edition, 1967.
- [193] DOE. *Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)*. U.S. Department of Energy, Morgantown, U.S.A., 2004.
- [194] Bernd Cebulski. Leistungselektroniken im Fahrzeugantrieb. *Automobiltechnische Zeitschrift - elektronik*, 1:20–24, 2011.
- [195] Jeremy P. Meyers. *Subfreezing Phenomena in Polymer Electrolyte Fuel Cells*, pages 369–382. Springer Science+Business Media, 2009.
- [196] DOE. Fuel cell Technologies Program Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan. Technical report, DOE, 2007.
- [197] R. Kalhammer, Fritz, Bruce M. Kopf, David H. Swan, Vernon P. Roan, and Michael P. Walsh. Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology. Technical report, State of California Air Resources Board, April 2007.
- [198] Christian Fickel, Daniel Gleyzes, Robert Harrison, and J rgen Gebert. Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug - F r emissionsfreie Mobilität. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 4:308–313, 2011.
- [199] Masaki Yoshio, Ralph J. Brodd, and Akiya Kozawa. *Lithium-Ion Batteries*. Springer, New York, 2009.
- [200] Varta. Batteriewissen, <http://www.varta-automotive.de>, abgerufen 2012.
- [201] GP-Batteries. Lithium Ion Technical Handbook, http://www.gpbatteries.com/html/pdf/Li-ion_handbook.pdf, 2000, abgerufen 2012
- [202] Gene Berdichevsky, Kurt Kelty, J.B. Straubel, and Erik Toomre. The Tesla Roadster Battery System. Technical report, Tesla Motors, USA, 2007.
- [203] Jim Douglass. Battery Management Architectures for Hybrid/Electric Vehicles. *Electronic Product Design*, 3:8–10, März 2009.
- [204] Konrad Reif. *Komponenten von Hybridfahrzeugen*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011.

-
- [205] Uwe Sauer. Einführung zu Batteriespeichern. Technical report, RWTH Aachen University, Stuttgart, 2011.
 - [206] Henning Wallentowitz. *Unkonventionelle Fahrzeugantriebe*. RWTH Aachen University, Aachen, 2004.
 - [207] Arno Mathoy. Grundlagen für die Spezifikation von E-Antrieben. *ATZ: Automobiltechnische Zeitschrift*, pages 556–563, 2010.
 - [208] Christian Prag. Eine Einführung in die permanenterregte Synchronmaschine (Interne Schulung). Technical report, Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen, 2011.
 - [209] Gerhard Babel. *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2009.
 - [210] Henning Wöhl-Bruhn. Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2010.
 - [211] Klaus Hofer. *Elektrotraktion*. VDE Verlag, Berlin, 2006.
 - [212] Q. Ren, D.A. Crolla, and A. Morris. Effect of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance. In *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*, pages 1260 – 1265, sept. 2009.
 - [213] Joachim Specovius. *Grundkurs Leistungselektronik - Bauelemente, Schaltungen und Systeme*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009.
 - [214] Maximilian Hofmann. Elektrische Antriebe für Fahrzeuge. In *Jahrestagung 2010*, Erlangen, 2010. Fraunhofer IISB, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie.
 - [215] Thore Graepel. Statistical Physics of Clustering Algorithms. Master’s thesis, TU Berlin, 1998.
 - [216] Glenn Fung. A Comprehensive Overview of Basic Clustering Algorithms, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.5.7425>, 2001.
 - [217] T.A. Wiggerts. Using Clustering Algorithms in Legacy Systems Remodularization. In *Proceedings of the Fourth Working Conference on Reverse Engineering*, pages 33–43, 1997.
 - [218] Gabler Wirtschaftslexikon. Eintrag „Dendrogramm“, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/dendrogramm.html>, abgerufen 2012.
 - [219] Lior Rokach. A survey of Clustering Algorithms. In *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. Springer, 2010.
 - [220] Udo Lindemann. Design Structure Matrix Website, <http://www.dsmweb.org>, abgerufen 2012.
 - [221] Carlos Gutierrez. Integration Analysis of Product Architecture to Support Effective Team Co-location. Technical report, Massachusetts, USA, 1998.

- [222] Pang-Ning Tan, Michael Steinbach, and Vipin Kumar. *Introduction to Data Mining*. Addison Wesley, 2005.
- [223] Kardi Teknomo. Distance for Binary Variables, <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/Similarity/BinaryVariables.html>, abgerufen 2012.
- [224] MathWorks. K-means clustering, <http://www.mathworks.de/help/toolbox/stats/kmeans.html>, abgerufen 2012.
- [225] MathWorks. Statistics Toolbox, <http://www.mathworks.de/help/toolbox/stats/>, abgerufen 2012.
- [226] Kardi Teknomo. K-Mean Clustering Tutorials, <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/kMean/>, abgerufen 2012.
- [227] G. Steierwald, H.D. Künne, and W. Vogt. *Stadtverkehrsplanung: Grundlagen, Methoden, Ziele*. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [228] VDI. VDI 2803: Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode. Technical report, 1996.
- [229] DIN. DIN EN 14514 Raumfahrttechnik Normen - Funktionenanalyse. Technical report, DIN, Berlin, 2004.
- [230] National Institute of Standards and Technology. Integration Definition for Function Modeling (IDEF0). Technical report, U.S. Department of Commerce, USA, 1993.
- [231] Alain Bouscayrol, Xavier Guillaud, Jean-Paul Hautier, and Philippe Delarue. Macromodélisation des conversions électromécaniques. *Revue Internationale de Génie Electrique*, 3(3):257–282, 2000.

18 Verzeichnisse

18.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sichten des Entwurfs und entsprechende Kapitelstruktur	12
Abbildung 2: Hierarchie der betrachteten Systemebenen	13
Abbildung 3: Einflussfaktoren und zu untersuchende Grundlagen für die Methodenableitung	14
Abbildung 4: Phasen des Wasserfallmodells nach [8]	15
Abbildung 5: Phasen des Spiralmodells nach [9]	15
Abbildung 6: V-Modell der Systementwicklung	16
Abbildung 7: Grundmuster der modellbasierten Entwicklung [13]	17
Abbildung 8: Beispiel für Zielmodell in SysML/UML-Notation [18]	20
Abbildung 9: Beispiel für ein Funktionsmodell nach [22]	21
Abbildung 10: Schritte des Konzeptentwurfs nach [22]	23
Abbildung 11: Elemente der hier verwendeten Architekturbeschreibung und ihre Hierarchie	23
Abbildung 12: Gruppierung von Funktionselementen in [35]	25
Abbildung 13: Kopplung von Funktionen und Verhaltensketten aus [45]	26
Abbildung 14: „Requirements-Diagramm“ für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [47])	27
Abbildung 15: „Use-Case-Diagramm“ für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [47])	27
Abbildung 16: „Block-Definition-Diagramm“ für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [47])	28
Abbildung 17: „Activity-Diagramm“ für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [47])	28
Abbildung 18: State-Machine-Diagramm für das SUV-Beispiel (Ausschnitt aus [47])	29
Abbildung 19: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle [49]	30
Abbildung 20: Struktur eines seriellen Hybridantriebs mit Verbrennungsmotor (Reif)	31
Abbildung 21: Grundstruktur der Energieversorgung eines Elektrofahrzeugs mit Brennstoffzelle [51]	31
Abbildung 22: Struktur eines elektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle [51]	32
Abbildung 23: Ansatz zur Definition und Demonstration einer verbesserten Methodik	34
Abbildung 24: Sichten des modellbasierten Entwurfs zur Spezifikation und Konzeptentwicklung	35
Abbildung 25: Vereinfachter Systementwicklungsablauf nach [60]	37
Abbildung 26: Änderungskosten im Laufe der Entwicklung [61]	37
Abbildung 27: Gegenüberstellung der Aufwände und Nutzen der Anforderungsphase	38

Abbildung 28: Aufwandsoptimum für die Requirements Engineering Phase [55] (Bei den Begriffen handelt es sich um eine Analogie zur industriellen Produktion: hohe Lagerbestände verursachen hohe Lagerkosten; die häufige Übergabe kleiner Mengen verursacht viele Handhabungsschritte)	38
Abbildung 29: Struktur des Zielbaums in Lebenszyklusphasen und Verfeinerungsstufen	41
Abbildung 30: Beispiel für textuelle Zielbeschreibung im Zielbaum (Top-Down-Zerlegung).....	42
Abbildung 31: Zuordnung von Lösungsmerkmalen zu Zielen (Funktional (rot), nicht-funktional (schwarz))	42
Abbildung 32: Aufdeckung von Zielkonflikten über Mehrfachverwendung von Merkmalen	43
Abbildung 33: Baumstruktur aus Zielen (Z), Merkmalen (M) und Anforderungsgruppen (A)	43
Abbildung 34: Beispiel für Zielbaum Inhalte (Dynamik als nicht-funktionale Eigenschaft definiert) ..	44
Abbildung 35: Ausschnitt aus dem Zielbaum des elektrischen Antriebssystems (funktionale Ziele)...	45
Abbildung 36: Identifizierter physikalischer Systemkontext aus der Use-Case-Analyse	46
Abbildung 37: Strukturierung des Use-Case-Modells am Beispiel des Tankens	47
Abbildung 38: Use-Case-Modell für die Fahrzeugebene (siehe vergrößerte Darstellung 16.2)	47
Abbildung 39: Struktur des Lastenhefts basierend auf der Modellierung (angelehnt an [68])	48
Abbildung 40: Ableitung der Elemente des Systemlastenhefts	49
Abbildung 41: Entwicklung der Anforderungsdatenbank in einem Zeitraum von drei Monaten	49
Abbildung 42: Arbeitsfluss der Teilmethodik für die Verhaltenssicht.....	51
Abbildung 43: Physikalischer Kontext für eine Betriebsart (Anforderungen an Schnittstellen zugeordnet)	52
Abbildung 44: Bedarfsleistung für stationäre Fahrt (Feste Getriebeübersetzung, keine Steigung)	53
Abbildung 45: Leistungsbedarf für Lastsprung von 10 % auf 90 % der Maximalleistung des Antriebs	54
Abbildung 46: Ergebnis der Längsdynamiksimulation für den NEFZ-Zyklus (Geschwindigkeit und Leistung).....	54
Abbildung 47: Ergebnis der Längsdynamiksimulation für den NEFZ-Zyklus (Fahrwiderstände)	55
Abbildung 48: Theoretische Maschinenkennlinie basierend auf der Längsdynamikberechnung	55
Abbildung 49: Bordnetz mit einem Wandler vor der Batterie (vergleichbar mit [98])	56
Abbildung 50: Verbrauch (ladestandskorrigiert) als Funktion des Hybridisierungsgrads.....	56
Abbildung 51: Gesamtsystemkosten als Funktion der Hybridisierung (Basis: [101], [102])	58
Abbildung 52: Elektrischer Leistungsbedarfs des Artemis Motorway-Zyklus	58

Abbildung 53: Arbeitsfluss für die Teilmethodik der Funktionssicht	60
Abbildung 54: Use-Case-Modell des Antriebssystems (Schematische Darstellung)	61
Abbildung 55: Modell des Systemkontextes	61
Abbildung 56: Isolierte Betrachtung einzelner Betriebsarten für die Modellierung des Gesamtsystems	62
Abbildung 57: Arbeitsfluss für die Servicezerlegung (Erster Schritt der Funktionsmodellierung)	63
Abbildung 58: Definition physikalischer Services zur Versorgung aller Akteure (schematische)	63
Abbildung 59: Elemente eines Regelkreises	63
Abbildung 60: Vollständige Systemzerlegung in Kontrollfunktionen (Schematische Darstellung)	64
Abbildung 61: Hierarchie der Unterfunktionen einer Kontrollfunktion gemäß Def. 6	65
Abbildung 62: Ausschnitt der Funktionsstruktur des Brennstoffzellensystems	65
Abbildung 63: Datenstruktur des Funktionsgraphen nach vollständiger Zerlegung	66
Abbildung 64: Arbeitsfluss der Funktionsvernetzung (Letzter Schritt der Funktionsmodellierung)	66
Abbildung 65: Wirkstruktur der Funktionselemente innerhalb einer Kontrollfunktion	67
Abbildung 66: Elemente einer Kontrollfunktion mit den zugehörigen Verbindungsgrößen	67
Abbildung 67: Bekannte Wirkstruktur, die in der Funktionsvernetzung berücksichtigt wird [111]	68
Abbildung 68: Werkzeugkette von den Funktionsbäumen zum vernetzten und gewichteten Graphen	68
Abbildung 69: Funktionsgraph mit Darstellung der physikalischen Flüsse	69
Abbildung 70: Funktionsgraph mit Darstellung der Kontrollflüsse	69
Abbildung 71: Betrachtete Referenzarchitektur - Packaging-Diagramm der Funktionskomponenten (Mit FP: First Power Source, SP: Second Power Source, ED: Electric Drive, EP: Electric Power (EEM: Elektrisches Energiemanagement, NV: Nebenverbraucher), VF: Vehicle Functions, DS: Diagnose, TS: Transmission System, PC: Braking Coordination, OV: Outside Voltage, LV: Low Voltage [100], [114])	73
Abbildung 72: Referenzsystems als Graph (Knoten: Subsysteme, Kanten: Signal- und Stoffflüsse) (Mit FP: First Power Source, SP: Second Power Source, ED: Electric Drive, EP: Electric Power, VF: Vehicle Functions, DS: Diagnose, TS: Transmission System, PC: Braking Coordination, OV: Outside Voltage, LV: Low Voltage	74
Abbildung 73: Modulnetzwerke aus der Clusterung der CON-Matrix (FOA1 und FOA3)	76
Abbildung 74: Modulnetzwerke aus der gewichteten Clusterung der CON-Matrix (FOAb1 und FOAb3)	77
Abbildung 75: Modulnetzwerk aus der gewichteten Clusterung der CONACT-Matrix	78

Abbildung 76: Kostenfunktion des DSM-Algorithmus aus [42] für den Durchlauf DSM3	79
Abbildung 77: Sortierte Kontrollfunktionsmatrix nach Durchlauf des DSM-Algorithmus (DSM3)....	79
Abbildung 78: Sortierte Funktionsmatrix mit physikalischen Verbindungen nach Durchlauf des DSM-Algorithmus (DSM8).....	79
Abbildung 79: Modulnetzwerk aus der DSM-Clusterung der Kontrollfunktionsmatrix (DSM3)	80
Abbildung 80: Kennzahlvergleich der Clusterexperimente mit der Kontrollfunktionsmatrix	81
Abbildung 81: Silhouettenplot der Modulaufteilung aus FOAb2 (Sieben Module)	82
Abbildung 82: Werkzeugkette vom Funktionsnetzwerk bis zum graphischen Architekturmodell	83
Abbildung 83: Funktionsarchitektur des elektrischen Antriebssystems (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4)	83
Abbildung 84: Blockdiagramm des Subsystems FP First Power Source (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4)	84
Abbildung 85: Blockdiagramm des Subsystems SP Second Power Source (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4).....	85
Abbildung 86: Blockdiagramm des Subsystems ED Electric Drive (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4).....	85
Abbildung 87: Blockdiagramm des Subsystems CSHT Cooling System High Temperature (Vereinfachte Darstellung; für eine detaillierte Darstellung siehe 16.4).....	86
Abbildung 88: Arbeitsfluss der physikalischen Spezifikation der Subsysteme.....	88
Abbildung 89: Variabilität von Zielgrößen als Resultat verschiedener interner Systemparameter und deren Variabilitäten.....	89
Abbildung 90: Schematische Darstellung einer kumulativen Abdeckungsfunktion	90
Abbildung 91: Darstellung der Parameterschwankungsbreite für unterschiedliche Anforderungsabdeckungen	90
Abbildung 92: Critical Parameter Management Flow Down [128]	91
Abbildung 93: Schwerpunkte für die Analyse der drei betrachteten Parametertypen.....	92
Abbildung 94: Schema eines Taguchi-Versuchsplans mit äußerem Störgrößenfeld [133].....	93
Abbildung 95: Taguchi-Versuchsplan mit Lastparametern als Störgrößen	93
Abbildung 96: Statistisch ausgewählte Zyklen und die Spektren der elektrischen Bedarfsleistung	94
Abbildung 97: Temperaturstatistik für Stuttgart [136]	94
Abbildung 98: Wesentliche Funktionsträger des Subsystems FP (First Power Source)[137], [138]	96
Abbildung 99: Modellstruktur für die Bestimmung der FP-Anforderungen (First Power Source).....	96

Abbildung 100: Modellstruktur für die Bestimmung der Stack-Anforderungen	97
Abbildung 101: Polarisationskennlinien in Abhängigkeit der Temperatur und der Membranfeuchte ..	98
Abbildung 102: Membranfeuchte in Abhängigkeit der relativen Feuchte in gesättigtem Zustand [148]	98
Abbildung 103: Physikalische Topologie der Luftversorgung mit Spezifikationsgrößen.....	99
Abbildung 104: Physikalische Topologie der Wasserstoffversorgung mit Spezifikationsgrößen	103
Abbildung 105: Modellstruktur für die Bestimmung der Wandleranforderungen (First Power Source)	104
Abbildung 106: Modellstruktur zur Bestimmung des Leistungsbedarfs des Verdichters (First Power Source).....	105
Abbildung 107: Modellstruktur für die Bestimmung der Stack-Verlustleistung (First Power Source)	106
Abbildung 108: Modellstruktur für die Bestimmung der Zustandsdaten der Eingangsluft	107
Abbildung 109: Wesentliche Funktionsträger des Subsystems SP.....	107
Abbildung 110: Modellstruktur für die Bestimmung der SP-Anforderungen (Second Power Source)	108
Abbildung 111: Modellstruktur für die Bestimmung der Batterieanforderungen	109
Abbildung 112: Elektrisches Ersatzschaltbild einer Lithium-Ionen-Zelle (S: Serieller Widerstand; TS: RC-Glied mit kurzer Zeitkonstante; TL: RC-Glied mit langer Zeitkonstante) [157]	109
Abbildung 113: Wirkungsgradkennfeld der Traktionsmaschine [95]	110
Abbildung 114: Modellstruktur für die Bestimmung der Kühlsystemanforderungen.....	111
Abbildung 115: Wesentliche Funktionsträger des Subsystems EP (Electric Power)	113
Abbildung 116: Stromkennlinie für maximale Brennstoffzellenleistung.....	113
Abbildung 117: Modellstruktur für die Spezifikation des Subsystems EP (Electric Power)	114
Abbildung 118: Betrieb des Brennstoffzellensystems innerhalb eines Fensters mit hohem Wirkungsgrad	115
Abbildung 119: Fahrleistungsanforderungen (Stuttgart).....	117
Abbildung 120: Anforderungen des Wasserstoffmassenstroms (Stuttgart).....	118
Abbildung 121: Anforderungen des Luftmassenstroms (Stuttgart).....	118
Abbildung 122: Brutto-Stackleistung im Vergleich zur elektrischen Leistungsanforderung	119
Abbildung 123: Elektrische Leistungsanforderungen (Stuttgart).....	120
Abbildung 124: Elektrische Leistungsanforderungen (Verbraucher und Bordnetz) (Stuttgart)	120

Abbildung 125: Anforderungen an Spannungswandler (Stuttgart)	121
Abbildung 126: Anforderungen für Eingangsparameter des Brennstoffzellensystems (Stuttgart)	121
Abbildung 127: Anforderungen für Brennstoffzellenparameter (Stuttgart)	122
Abbildung 128: Kühlungsanforderungen Hochtemperaturkreislauf (Stuttgart)	122
Abbildung 129: Kühlungsanforderungen Niedertemperaturkreislauf (Stuttgart)	123
Abbildung 130: Arbeitsfluss der Teilmethodik für die Verhaltenssicht	129
Abbildung 131: Zusammenhang zwischen Funktionen, Aktivitäten und den Use-Cases	130
Abbildung 132: Zugehörige Pakete der Betriebsart „Start“	132
Abbildung 133: Aktivitätszerlegung des Use-Case „Kaltstart“	132
Abbildung 134: Modellierungsablauf für das Verhaltensmodell	133
Abbildung 135: Verhaltensmodell für den Use-Case Start	134
Abbildung 136: Werkzeugkette zur Analyse der Verhaltensmodelle	135
Abbildung 137: Graph der Aktivitäten für Start-Use-Case (graue Knoten = permanente Aktivitäten)	135
Abbildung 138: Zeitliche Anordnung der Start-Aktivitäten basierend auf dem SysML- Verhaltensmodell	137
Abbildung 139: Erstellung des Sequenzdiagramms aus Subsystemstruktur und logischen Abläufen	138
Abbildung 140: Ausschnitt aus dem Sequenzdiagramm für den Haupt-Startfall (siehe auch 16.6) ...	139
Abbildung 141: Arbeitsfluss der Teilmethodik für die Verhaltenssicht	141
Abbildung 142: Zustandsmodell für das Brennstoffzellensystem (Startsequenz, Subsystem FP: First Power Source)	143
Abbildung 143: Zustandsmodell für das Batteriesystem (Startsequenz, Subsystem Second Power Source)	144
Abbildung 144: Zustandsmodell für den Systemarbitrierer (Startsequenz, Subsystem SA: System Arbitrator; NTKMP: Niedertemperaturkühlmittelpumpe; ED: Electric Drive; SP: Second Power Source; HV: High Voltage)	145
Abbildung 145: Modellstruktur für die Verhaltenssimulation	146
Abbildung 146: Modellstruktur des Aufheizmodells für den Brennstoffzellenstapel	147
Abbildung 147: Temperaturabhängige Zelleistungskennlinien für die Brennstoffzelle	148
Abbildung 148: Zeitverlauf des Aufheizvorgangs für das Brennstoffzellensystem [s]	149
Abbildung 149: Zeitverlauf des Aufheizvorgangs für das Batteriesystem [s]	149

Abbildung 150: Ansteigende Systemleistung und Fahrfreigaben durch den Zustandsautomaten.....	150
Abbildung 151: Reaktives Verhalten des Zustandsautomaten SA während der Kaltstartsimulation ..	150
Abbildung 152: Reaktives Verhalten des Zustandsautomaten SP während der Kaltstartsimulation...	150
Abbildung 153: Reaktives Verhalten des Zustandsautomaten FP während der Kaltstartsimulation...	151
Abbildung 154: Pyramidale Struktur aus Problemanalyse, Methodikentwicklung und Anwendung („Bottom-Up“-Vorgehensweise).....	153
Abbildung 155: Systemlebenszyklus nach IEEE Std 1220-1998 [62]	160
Abbildung 156: Teilprozesse des Systementwurfs nach [2].....	160
Abbildung 157: Systementwicklungsablauf nach IBM Rational Harmony SE [189].....	161
Abbildung 158: Domänen der Vitech-MBSE-Methodik nach [5].....	161
Abbildung 159: Zustandsbasierte Regelarchitektur [190].....	162
Abbildung 160: Übersicht über Modellierungsansätze (dunkelblau), Abstraktionsebenen (blau) und Artefaktklassen (grau) der REMsES-Methodik [16].....	162
Abbildung 161: Prozessebenen und zu definierende Modellelemente in AutoMoDe.....	163
Abbildung 162: Zerlegung in Aktivitäten am Beispiel einer Fahrzeugverwendung [48]	163
Abbildung 163: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle [49]	164
Abbildung 164: Schematischer Aufbau einer einzelnen Brennstoffzelle [49]	164
Abbildung 165: Zellspannung (hell) und Zellwirkungsgrad (dunkel) einer einzelnen Brennstoffzelle	166
Abbildung 166: Aufbau einer Einzelzelle und Reihenschaltung zum Zellstapel [192].....	167
Abbildung 167: Brennstoffzellensystem im elektrischen Antriebsstrang [49].....	167
Abbildung 168: Erhöhung des Elektrodenpotentials durch Druckerhöhung.....	168
Abbildung 169: Sättigungsdampfdruck nach der Antoine-Gleichung	169
Abbildung 170: Leistungs- und Wirkungsgradverhaltens von Brennstoffzellen [49].....	170
Abbildung 171: Betriebspunkte maximalen Wirkungsgrads und maximaler Leistung [49]	170
Abbildung 172: Zweikreis-Kühlsystemtopologie im elektrischen Antriebsstrang [49] (HWT: Heizungswärmetauscher; PWR: Pulswechselrichter; ELM: Elektrische Maschine; WT: Wärmetauscher).....	172
Abbildung 173: Vergleich verschiedener Energiespeicher im Ragone-Diagramm [199]	174
Abbildung 174: Prinzipdarstellung eines Lithium-Ionen-Akkumulators [202]	175
Abbildung 175: Aufbau eines Batteriepacks aus Modulen und Einzelzellen.....	175

Abbildung 176: Vollständiges Batteriesystem (1: Batterieklemmen; 2: Vorladewiderstand; 3: Sicherung; 4: Batteriemanagementsystem; 5: Batteriepack; 6: Kühlgebläse; HS: Hauptschutz; VS: Vorladeschutz) [206].....	176
Abbildung 177: Batteriespannung bei Entladung mit verschiedenen Entladeströmen [207].....	176
Abbildung 178: Temperaturabhängige Leistungsgrenzen einer Li-Ionen-Hybridbatterie [183].....	177
Abbildung 179: Entladeregime von Traktionsbatterien [207].....	177
Abbildung 180: Klassifikation elektromechanischer Energiewandler [208].....	178
Abbildung 181: Schematische Darstellung des Blechschnitts einer PMSM [210]	178
Abbildung 182: Drehmoment und Leistungskennlinie der Synchronmaschine	179
Abbildung 183: Betriebsgrenzen einer elektrischen Maschine [208]	180
Abbildung 184: Bedarfsradmoment und Antriebsmoment für fiktive Kennlinie	181
Abbildung 185: Gegenüberstellung von Bedarfsleistung und Antriebsleistung.....	181
Abbildung 186: Prinzip eines schaltenden Spannungswandlers am Beispiel Tiefsetzsteller [215]	182
Abbildung 187: Tiefsetzsteller [215].....	183
Abbildung 188: Strom und Spannungsverlauf eines Tiefsetzstellers [215]	183
Abbildung 189: Hochsetzsteller, [215].....	184
Abbildung 190: Spannungslagen von Batterie (dunkel) und Brennstoffzellenstapel (hell)	185
Abbildung 191: Dreiphasige Wechselrichterbrücke [211]	185
Abbildung 192: Dendrogramm [220].....	187
Abbildung 193: Netzwerk und zugehörige Design Structure Matrix [222]	188
Abbildung 194: DSM-Eintrag in vier Kategorien nach [30].....	188
Abbildung 195: Matrix vor und nach der Diagonalisierung zur Modulidentifikation [222].....	189
Abbildung 196: Verteilung der vorhandenen mittleren Distanzen der Kontrollfunktionen	192
Abbildung 197: Dendrogramme der unterschiedlichen Abstandsmatrizen	192
Abbildung 198: Elektrische Bedarfsleistung bei Zyklusfahrt (Grossglockner-Auffahrt).....	195
Abbildung 199: Statistisch ausgewählte Zyklen und die Spektren der elektrischen Bedarfsleistung .	196
Abbildung 200: Auswahl der Temperaturdaten.....	196
Abbildung 201: Temperaturstatistik für Stuttgart [136]	196
Abbildung 202: Packagediagramm aller Entwurfssichten der modellbasierten Methodik	197
Abbildung 203: Use-Case-Modell der Gesamtfahrzeugebene	198

Abbildung 204: Physikalischer Kontext für die Betriebsart „Fahren“ (mit zugeordneten Anforderungen)	199
Abbildung 205: Servicezerlegung für die Betriebsart „Fahren“	200
Abbildung 206: Funktionale Wirkkette des physikalischen Services „Drehmoment bereitstellen“ ...	201
Abbildung 207: Detaillierung der Funktionszerlegung für das Brennstoffzellensystem	202
Abbildung 208: Funktionsarchitektur des elektrischen Antriebssystems mit Brennstoffzellen	203
Abbildung 209: Beispiel eines umsatzorientierten Funktionsmodells für einen Palettierroboter [23] Im Gegensatz zu anderen Darstellungen, werden hier zusätzlich Zwischenzustände identifiziert.....	204
Abbildung 210: Beispiel für IDEF0 Funktionsdiagramm [234]	204
Abbildung 211: Beispiel für ein FFBD [2].....	205
Abbildung 212: Beispiel für ein EMR-Modell einer Antriebskette [144].....	205
Abbildung 213: Modelltypen der SysML [21]	205
Abbildung 214: Gesamtansicht	206
Abbildung 215: Ausschnitt (linke Seite)	207
Abbildung 216: Ausschnitt (rechte Seite).....	208
Abbildung 217: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die Clusterung der Kontrollflussmatrix (FOA1)	209
Abbildung 218: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die Clusterung der CON-Matrix (FOA3)	210
Abbildung 219: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die gewichtete Clusterung der CON-Matrix (FOAb1).....	211
Abbildung 220: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die gewichtete Clusterung der CON-Matrix (FOAb3).....	212
Abbildung 221: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die Clusterung der CONACT-Matrix	213
Abbildung 222: Package-Diagramm der Funktionsgruppen für die DSM-Clusterung der Kontrollflussmatrix.....	214
Abbildung 223: Eingangsszenario für die Verhaltenssimulation der Zustandsautomaten	215
Abbildung 224: Physikalisches Verhalten von Batterie und Brennstoffzelle während der Kaltstartsituation (mit der Annahme 20 erhöhter Verlustleistung der Brennstoffzelle)	216

Abbildung 225: Reaktives Verhalten der Zustandsautomaten während der Kaltstartsimulation (mit der Annahme 20 % erhöhter Verlustleistung der Brennstoffzelle)	217
--	-----

18.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Use-Case-Formulierung am Beispiel des Warmstarts	21
Tabelle 2: Gegenüberstellung der Notationen zur Funktionsmodellierung	22
Tabelle 3: Unterschiede zwischen Aktivitätsdiagrammen und Zustandsautomaten [47]	29
Tabelle 4: Statistik der Zielbaumerstellung für den elektrischen Antriebsstrang	44
Tabelle 5: Use-Case-Formulierung am Beispiel der Wasserstoffbetankung	46
Tabelle 6: Statistik der Use-Case-Modellierung für die Gesamtfahrzeugebene	47
Tabelle 7: Beispiele für Fahrleistungsvorgaben im Systemlastenheft	48
Tabelle 8: Statistik der Lastenhefterstellung für die Gesamtfahrzeugebene	49
Tabelle 9: Versuchsmatrix für die Partitionierungsexperimente	75
Tabelle 10: Parameterspezifikation der elektrischen Motorleistung [kW]	117
Tabelle 11: Parameterspezifikation des H ₂ -Massenstroms [g/s]	118
Tabelle 12: Parameterspezifikation des Luftmassenstroms [g/s]	119
Tabelle 13: Parameterspezifikation der Brutto-Stackleistung [kW]	119
Tabelle 14: Parameterspezifikation der Batterieleistung auf der Bordnetzseite [kW]	120
Tabelle 15: Parameterspezifikation für die im Betrieb auftretende Stellgrenze der Brennstoffzelle [kW]	120
Tabelle 16: Parameterspezifikation der Befeuchter-Dampfmenge [g/s]	121
Tabelle 17: Use-Case „Start“ aus der Systemanalyse des Brennstoffzellensystems	131
Tabelle 18: Eventkette des Use-Case „Startvorbereitung“	131
Tabelle 19: Randbedingungen für die Erwärmung des Brennstoffzellensystems	147
Tabelle 20: Randbedingungen für die Erwärmung der Batterie	148
Tabelle 21: Betrachtungsschwerpunkte und Festlegungen als Ergebnis der Problemanalyse	154
Tabelle 22: Betrachtungsschwerpunkte und Ergebnisse der Methodikentwicklung	154
Tabelle 23: Betrachtungsschwerpunkte und Ergebnisse der Anwendung	158
Tabelle 24: Elemente der Brennstoffzellen [137]	165
Tabelle 25: Typische Produktmerkmale elektrischer Antriebssysteme	173

18.3 Abkürzungen und Formelzeichen

A	Querschnittsfläche
$A_{Kühler}$	Kühlerfläche
A_Z	Zellfläche
B_f	Ständerfeld
C	Straffunktion
C	Gewichtungsvektor
\overline{CNACT}	Verbindungsmatrix Kontrollfunktionen und Systemaktivitäten
\overline{CNUC}	Verbindungsmatrix Kontrollfunktionen und Use-Cases
C_{TL}	Kapazität eines RC-Glieds mit langer Zeitkonstante
C_{TS}	Kapazität eines RC-Glieds mit kurzer Zeitkonstante
C_n	Kontrollfluss
D	Duty cycle
$D_{Elemente_{i,j}}$	Abstandsmatrix
$D_{centroids_{ij}}$	Abstandsmatrix zu Zentren
$D_{Zentrum}$	Matrix der Zentren
D_{ges}	Erwartungswert der Gesamtstrecke
$D_{pi,median}$	Abstände der Clustermitglieder zum Medianwert
E^0	Standardpotential
E_{Bat}	Energieinhalt Batterie
E_H^0	Heizwertspannung
E_Z	Zellspannung
$E_{el,Zyklus}$	Energiebedarf Zyklus
F	Faradaykonstante

F_R	Rollwiderstandskraft
F_W	Fahrwiderstände
F_a	Beschleunigungswiderstandskraft
I	Strom
I_1	Strom zum Zeitpunkt 1
$I_{BZ,ls}$	Brennstoffzellenstrom low side
I_{Bat}	Batteriestrom
I_{HS}	Strom high side
I_{grenz}	Grenzstrom
J	Massenträgheitsmoment
J_δ	Jaccard-Distanz
K	Kante an Funktion i
K_B	Batteriekapazität
K_K	Komponentenkosten
$L(SOC)$	Strafffunktion (in Abhängigkeit vom Batterieladestand)
M_{EM}	Bedarfmoment E-Maschine
M_R	Bedarfmoment
M_R	Drehmoment Rad
M	Drehmoment
M_W	Widerstandsmoment
M_a	Antriebsmoment
M_i	Molmasse Phase i
N	Anzahl der Matriceinträge
$P_{Stapelbrutto}$	Brutto-Stapelleistung
$P_{Stapelnetto}$	Netto-Stapelleistung
$P_{Antrieb}$	Antriebsleistung

$P_{BAT,netto}$	Maximale Batterie-Nettoleistung
$P_{BZ,Limit}$	Aktuelle Stellgrenze der Brennstoffzelle
$P_{BZ,netto}$	Maximale Brennstoffzellen-Nettoleistung
$P_{Bat,Limit}$	Aktuelle Stellgrenze der Batterie
P_{Bat}	Batterieleistung
$P_{Entladen,max}$	Maximale Entladeleistung Zelle
P_{HRB}	Leistung „Hydrogen Recirculation Blower“
P_{HS}	Leistung high side
P_{KMH}	Leistung Kühlmittelheizer
P_{LS}	Leistung low side
P_{Last}	Leistung der elektrischen Last
P_{Stapel}	Stapelleistung
P_{Sys}	Leistung Brennstoffzellensystem
$P_{V,Bat}$	Verlustleistung Batteriepack
$P_{V,DCDC}$	Verlustleistung des DC/DC-Wandlers
$P_{V,HRB}$	Verlustleistung „Hydrogen Recirculation Blower“
$P_{V,HT,ED}$	Verlustleistung Hochtemperaturteil des Subsystems ED
$P_{V,HT,FP}$	Verlustleistung Hochtemperaturteil des Subsystems FP
$P_{V,Stapel}$	Verlustleistung Brennstoffzellenstapel
$P_{Z,max}$	Maximale Leistungsdichte
P_Z	Wahrscheinlichkeit des Auftretens Zyklustyp Z
P_{ein}	Eingangsleistung
$P_{el,BZ,hs}$	Elektrische Leistung Brennstoffzelle high side
$P_{el,BZ,ls}$	Elektrische Leistung Brennstoffzelle low side
$P_{el,Bat,HS,Bedarf}$	Leistungsanforderung der Batterie (High Side des Wandlers)

$P_{el,BAT,Limit}$	Entladegrenze Batteriesystem
$P_{el,BZ,Defizit}$	Leistungsdefizit Brennstoffzelle
$P_{el,BZ,HS,Bedarf}$	Leistungsanforderung der Batterie (High Side des Wandlers)
$P_{el,BZ,HS,Bedarf}$	Anforderungsleistung an die Brennstoffzelle (high side)
$P_{el,BZ,Limit,max}$	Aktualisierte Stellgrenze
$P_{el,BZ,eta-high}$	Obere Leistungsgrenze der Brennstoffzelle
$P_{el,BZ,eta-low}$	Untere Leistungsgrenze der Brennstoffzelle
$P_{el,SYS,Defizit}$	Systemleistungsdefizit
$P_{el,Sys}$	Gesamter elektrischer Leistungsbedarf des Systems
P_{el}	Elektrische Leistung
P_{ges}	Gesamtleistung
$P_{max,BZ}$	Maximalleistung Brennstoffzelle
$P_{verd,brutto}$	Verdichterleistung
\dot{Q}_K	Wärmeabfuhr Kühler
$\dot{Q}_{Kühlmittel}$	Kühlmittelwärmeeintrag
\dot{Q}_R	Reaktionswärme
R	Gaskonstante
R_S	Serieller Widerstand
R_{TL}	Widerstand eines RC-Glieds mit langer Zeitkonstante
R_{TS}	Widerstand eines RC-Glieds mit kurzer Zeitkonstante
$R_{i,ges}$	Innenwiderstand Batteriepack
S	Cluster
T	Temperatur
T_{BZ}	Temperatur der Brennstoffzelle
T_{BZ}	Temperatur des Brennstoffzellenstapels

T_E	Einschaltzeit
$T_{St,ein}$	Soll-Eingangstemperatur Zellstapel
T_U	Umgebungstemperatur
$T_{ein,ZK}$	Eingangstemperatur Zwischenkühler
T_{mot}	Temperatur der Antriebsmaschine
$U_{BZ,ls}$	Brennstoffzellenspannung low side
U_{CACT}	Verbindungsmatrix Use-Cases und Systemaktivitäten
$U_{Kl,min}$	Minimale Klemmenspannung
U_{Nenn}	Nennspannung
U_{ocv}	Offene Zellspannung (Open Cell Voltage)
U_{Stapel}	Stapelspannung
U_V	Spannungsverlust Brennstoffzellensystem
U_{aus}	Ausgangsspannung
U_{ein}	Eingangsspannung
U_{min}	Minimalspannung
$U_{th,max}$	Theoretische Spannung
X, Y	Elementmengen
ΔG^0	Freie Reaktionsenthalpie bei Standardbedingungen
ΔH^0	Enthalpie bei Standardbedingungen
$\Delta T_{L,ZK}$	Solltemperaturhub über Zwischenkühler

a_x	Beschleunigung
a	Anzahl der Systemaktivitäten
c_{pKW}	Wärmekapazität Kühlwasser
c_W	Widerstandsbeiwert

$c_{p,KM}$	Wärmekapazität Kühlmittel
d	Dice-Distanz
e_i	Massenfaktor
f_1	Frequenz des Erregerstroms
f_R	Rollreibungsbeiwert
g	Erdbeschleunigung
g_{cn}	Gewichtung Kante Kontrollfunktion
g_{fi}	Gewichtung Kante Funktion i
\bar{g}_f	Freie molare Reaktionsenthalpie
h	Wärmeübergangskoeffizient
(h)	Höhe über dem Meeresspiegel
\bar{h}_f	Molare Enthalpie
i	Anzahl der Zeilen
i_d	Strangstrom d
i_{ges}	Gesamtübersetzung
j	Anzahl der Spalten
k	Clusteranzahl
k_K	Spezifische Komponentenkosten
k_{median}	Komponentenweiser Median zum Clustermittelpunkt
l	Länge der Maschine
m	Gesamtmasse
m_{Fzg}	Fahrzeugmasse
m_{zu}	Zuladungsmasse
$\dot{m}_{H_2,Stapel}$	Massenstrom Wasserstoff Zellstapel
$\dot{m}_{KL,HT,Bedarf}$	Benötigter Kühlmittelstrom Hochtemperaturteil

$\dot{m}_{KL,verf}$	Verfügbarer Kühlluftstrom
$\dot{m}_{KM,HT,Bedarf}$	Benötigter Kühlmittelstrom Hochtemperaturteil
\dot{m}_{KW}	Kühlwassermassenstrom
$\dot{m}_{L,feucht}$	Massenstrom feuchter Luft
$\dot{m}_{L,Stapel}$	Luftmassenstrom Zellstapel
$\dot{m}_{L,st,Stapel}$	Stöchiometrischer Luftmassenstrom Zellstapel
\dot{n}_{Abgas}	Stoffmengenstrom Abgas
$\dot{n}_{D,ein}$	Stoffmengenstrom Dampf Brennstoffzelleneingang
$\dot{n}_{H2,st,Stapel}$	Stoffmengenstrom Wasserstoff stöchiometrisch Zellstapel
$\dot{n}_{H2O,Bef}$	Stoffmengenstrom Wasser Befeuchter
$\dot{n}_{H2O,aus}$	Stoffmengenstrom Wasser Brennstoffzellenausgang
$\dot{n}_{N2,ein}$	Stoffmengenstrom Stickstoff Brennstoffzelleneingang
$\dot{n}_{O2,ein}$	Stoffmengenstrom Sauerstoff Brennstoffzelleneingang
$\dot{n}_{O2,st,Stapel}$	Stoffmenge Sauerstoff
$\dot{n}_{W,prod}$	Stoffmengenstrom Produktwasser
n	Zeilenindex Matrix/ Anzahl der Beobachtungen
n_1	Synchrondrehzahl
$n_{D,ein}$	Stoffmenge Dampf Brennstoffzelleneingang
$n_{L,ein}$	Stoffmenge Luft Brennstoffzelleneingang
n_{VM}	Größe Versuchsmatrix
n_Z	Zellzahl
n_{ZB}	Zellzahl Batterie
n_i	Element innerhalb eines Clusters/Moduls
p	Clustermitglieder
p	Polpaarzahl

p	Spaltenindex Matrix
$p(h)$	Luftdruck als Funktion der Höhe
$p_{Autobahn}$	Wahrscheinlichkeit des Auftretens Autobahn
$p_{D,ein}$	Eingangsdampfdruck
p_D	Dampfdruck
$p_{L,ein}$	Eingangsluftdruck
$p_{Landstraße}$	Wahrscheinlichkeit des Auftretens Landstraße
$p_{S,D}$	Sättigungsdampfdruck
$p_{S,ein}$	Sättigungsdampfdruck Brennstoffzelleneingang
p_{Stadt}	Wahrscheinlichkeit des Auftretens Stadtstrecke
p_U	Umgebungsdruck
p_W	Wasserdampfpartialdruck
$p_{ein,ZK}$	Zwischenkühler Eingangsdruck
p_i	Partialdruck Phase i
p_{sat}	Sättigungsdampfdruck
r	Rotordurchmesser
r_{dyn}	Dynamischer Radradius
\bar{s}	Molare Entropie
t_0	Startzeitpunkt
t_Z	Zyklusdauer
v	Geschwindigkeit
v_{Fzg}	Fahrzeuggeschwindigkeit
w	Gewichtungsfaktor
\bar{x}	Inputfaktoren
x_{hybrid}	Hybridisierungsgrad

x_{exp}	Anzahl gewählter Experimente
x_i	Stoffmengenanteil Phase i
x_j	Clusterpunkt
x_p	Anteil gewählter Perzentile aus dem Fahrzyklus
\bar{y}	Ausgangsgrößen
z_{VM}	Zeilenzahl Versuchsmatrix

α_H	Parameter
α_L	Parameter
η_{BZ}	Wirkungsgrad Brennstoffzelle
η_{ELM}	Verlustleistung elektrische Maschine
η_{EM}	Wirkungsgrad E-Maschine
$\eta_{Kühler}$	Kühlerwirkungsgrad
η_V	Verdichterwirkungsgrad
η_{is}	Isentropenwirkungsgrad
η_{mech}	Mechanischer Wirkungsgrad
η_{sys}	Systemwirkungsgrad
η_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad
κ	Isentropenexponent
λ	Membranfeuchte
λ_{30C}	Membranfeuchte (30 °C)
λ_{H2}	Wasserstoffüberschuss
λ_L	Luftüberschuss
λ_{O2}	Sauerstoffüberschuss
μ_{FZ}	Mittelwert der Fahrzeitverteilung

μ_i	Durchschnitt der Punkteabstände
μ	Nutzungsgrad
$\mu(\bar{d}_Z)$	Mittelwert der Distanzen des hinterlegten Zyklustyps
$\rho(h)$	Luftdichte als Funktion der Höhe
ρ_L	Luftdichte
σ	Lokale Beeinflussung der Aktivitäten
σ_E	Standardabweichung der Ergebnisgröße
σ_{FZ}	Standardabweichung der Fahrzeitverteilung
σ_i	Standardabweichung der Parameter
τ	Zeitkonstante
φ_{ein}	Relative Feuchte Brennstoffzelleneingang
φ	Relative Feuchte
ϕ	Relative Luftfeuchtigkeit
ω	Kreisgeschwindigkeit
ω_{EM}	Drehgeschwindigkeit E-Maschine
ω_R	Drehgeschwindigkeit Rad
<i>AOA</i>	Aktivitätsorientierte Architektur
<i>CSHT</i>	Cooling System High Temperature
<i>CSLT</i>	Cooling System Low Temperature
<i>DSM</i>	Design Structure Matrix
<i>DSM</i>	Design Structure Matrix
<i>ED</i>	Electric Drive
<i>EDC</i>	Electric Drive – Cooling
<i>EDD</i>	Electric Drive – Driveline

<i>EDI</i>	Electric Drive – Inverter
<i>EDM</i>	Electric Drive – Machine
<i>EP</i>	Electric Power
<i>En</i>	Energiefluss
<i>FOA</i>	Funktionsorientierte Architektur
<i>FOAb</i>	Funktionsorientierte Architektur mit Gewichtung
<i>FP</i>	First Power Source
<i>FPA</i>	First Power Source – Air System
<i>FPC</i>	First Power Source - Coordinator
<i>FPF</i>	First Power Source – Fuel System
<i>FPI</i>	First Power Source – Electrical Interface
<i>FPS</i>	First Power Source - Stack
<i>FPT</i>	First Power Source – Tank System
<i>HVAC</i>	Heating, Ventilation, Air Conditioning
<i>LV</i>	Low Voltage
<i>MSI</i>	Module Strength Indicator
<i>Mt</i>	Materialfluss
<i>N</i>	Normalverteilte Zufallsvariable
<i>NTKMP</i>	Niedertemperaturkühlmittelpumpe
<i>OV</i>	Outside Voltage
<i>Phys</i>	Physikalischer Fluss
<i>PC</i>	Powertrain Coordinator
<i>PD</i>	Powertrain Diagnostics
<i>SC</i>	System Arbitrator
<i>SOC</i>	State of charge (Batterieladestand)

<i>SP</i>	Second Power Source
<i>SPI</i>	Second Power Source – Electrical Interface
<i>SPT</i>	Second Power Source – Traction Storage
<i>VF</i>	Vehicle Functions

Band / Volume 239

**High Temperature Corrosion of Alloys and Coatings in Gas-Turbines
Fired with Hydrogen-Rich Syngas Fuels**

W. Nowak (2014), 201 pp

ISBN: 978-3-95806-012-8

Band / Volume 240

**Einfluss neuer Membranmaterialien auf Herstellung
und Betrieb von Direktmethanol-Brennstoffzellen**

S. Hürter (2014), V, 164 pp

ISBN: 978-3-95806-013-5

Band / Volume 241

Spannungsinduziertes Versagen in Hochtemperaturschichtsystemen

C. Nordhorn (2014), v, 118 pp

ISBN: 978-3-95806-016-6

Band / Volume 242

**Änderungsdetektion digitaler Fernerkundungsdaten
mittels objekt-basierter Bildanalyse**

C. Listner (2014), 176 pp

ISBN: 978-3-95806-017-3

Band / Volume 243

**Räumlich hoch aufgelöste Modellierung des Spaltprodukt-
verhaltens in einem HTR-Core mit kugelförmigen oder pris-
matischen Brennelementen**

A. Xhonneux (2014), viii, 239 pp

ISBN: 978-3-95806-020-3

Band / Volume 244

**Effects of Cercospora leaf spot disease on sugar beet genotypes
with contrasting disease susceptibility**

S. Schmittgen (2015), 121 pp

ISBN: 978-3-95806-021-0

Band / Volume 245

**Light scattering and trapping in thin film
silicon solar cells with an n-i-p configuration**

W. Böttler (2015), 132 pp

ISBN: 978-3-95806-023-4

Band / Volume 246

Nanostructured Si-alloys for silicon solar cells

K. Ding (2015), 210 pp

ISBN: 978-3-95806-024-1

Band / Volume 247

Electrochemical Texturing and Deposition of Transparent Conductive Oxide Layers for the Application in Silicon Thin-Film Solar Cells

J.-P. Becker (2015), ix, 156, XXIV pp

ISBN: 978-3-95806-027-2

Band / Volume 248

Stoffliche Charakterisierung radioaktiver Abfallprodukte durch ein Multi-Element-Analyseverfahren basierend auf der instrumentellen Neutronen-Aktivierungs-Analyse – MEDINA –

A. W. Havenith (2015), 311 pp

ISBN: 978-3-95806-033-3

Band / Volume 249

Quantitative Two-Layer Inversion and Customizable Sensor-Array Instrument for Electromagnetic Induction based Soil Conductivity Estimation

A. T. Mester (2015), viii, 119 pp

ISBN: 978-3-95806-035-7

Band / Volume 250

Partial Neutron Capture Cross Sections of Actinides using Cold Neutron Prompt Gamma Activation Analysis

C. Genreith (2015), vii, 166, XXXII pp

ISBN: 978-3-95806-036-4

Band / Volume 251

Long Term Aerosol Composition Measurements at the CESAR Tower at Cabauw, NL

P. Schlag (2015), iii, 228 pp

ISBN: 978-3-95806-037-1

Band / Volume 252

Modellbasierte Spezifikationsmethodik zur effizienten Systementwicklung von Brennstoffzellenantrieben

R. Biurrun Sotelo (2015), 255 pp

ISBN: 978-3-95806-038-8

Weitere **Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich** unter
<http://www.zbw1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp>

Energie & Umwelt /
Energy & Environment
Band / Volume 252
ISBN 978-3-95806-038-8

